das peças, ao contrário da transformação martensítica que, além de muito rápida logo que se atinge a temperatura M_s no arrefecimento, não é uniforme em toda a espessura das peças visto a velocidade de arrefecimento ser sempre maior junto à superfície. Ora, para uma mesma temperatura, a densidade da austenite é maior do que a das estruturas em que se transforma, com ou sem difusão, pelo que há sempre aumento de volume nessas transformações. Tal aumento origina tensões que, no caso da transformação martensítica, são obviamente muito mais perigosas devido à velocidade e heterogeneidade característica desta transformação.

Os problemas de distorção e mesmo de fissuração das peças, especialmente quando de formas complexas, devido às variações de volume resultantes quer da dilatação ou contracção térmica, quer das diferenças de densidade das diversas estruturas, associadas à heterogeneidade das temperaturas através das peças, são muitas vezes difíceis de resolver cabalmente, exigindo uma íntima colaboração entre os projectistas e a secção de tratamentos térmicos.

Também a verificação de eventuais fissuras, superficiais ou interiores, bem como da profundidade de endurecimento obtida, exige todo um conjunto de ensaios não destrutivos, desde os líquidos penetrantes aos ultra-sons e correntes de Foucault, cuja interpretação reveste por vezes apreciável dificuldade.

Ainda outros problemas também de grande importância são os ocasionados pelas operações de rectificação final das peças, pelos perigos que acarretam de aberturas de fendas superficiais devido às tensões residuais ou de amaciamento local por aquecimento exagerado, bem como a protecção das peças contra a descarburação superficial durante a austenitização (que obriga muitas vezes à utilização de banhos de sais ou de atmosferas controladas), e o controlo rigoroso das temperaturas de tratamento.

As estruturas resultantes tanto da austêmpera como do revenido da martensite dependem da temperatura a que foram obtidas, pelo que é possível conseguir uma larga gama de propriedades para os aços tratados. No entanto, a previsão quer da estrutura que resultará de dado ciclo térmico quer das propriedades que dessa estrutura resultarão, embora possa fazer-se com uma certa aproximação, mercê da cada vez maior quantidade (e qualidade) de informação que vai sendo acumulada, não evita que se mantenha ainda uma larga margem de incerteza, obrigando a investigação caso a caso para uma optimização do tratamento.

Tem sido praticamente apenas no estrangeiro que se têm desenvolvido os conhecimentos básicos nesta área. A par de estudos cada vez mais pormenorizados sobre as diversas microestruturas e a sua génese, bem como sobre as propriedades que delas resultam (através da utilização de microscopia de luz visível e electrónica de transmissão e de varrimento, de ensaios de difracção, dilatométricos e mecânicos, de análise química por micro-sonda electrónica, etc.), têm-se desenvolvido novos métodos de tratamento fazendo uso dos progressos da ciência e da técnica noutros domínios, os quais permitem uma posição de vanguarda dos países neles desenvolvidos.

Assim, por exemplo, dado que em muitos casos a propriedade mais procurada é uma boa resistência ao desgaste, promovem-se muitas vezes modificações estruturais apenas numa fina película superficial das peças. Estas modificações podem conseguir-se quer por simples têmpera superficial quer por alteração da composição química dessa película. No primeiro caso austenitiza-se apenas a película a endurecer, por meio de um aquecimento muito rápido através de correntes eléctricas induzidas de alta frequência aproveitando o «efeito pelicular», ou por incidência na superfície de raios «laser», de chamas como a oxi-acetilénica, e ainda por bombardeamento de electrões sob vácuo, seguindo-se um arrefecimento também rápido que, conforme os casos, pode ser por transmissão do calor para um meio exterior às peças ou para o próprio interior, ainda frio, das peças. No segundo caso, em que se incluem a cementação, a nitruração, a boretação, etc., usam-se também métodos cada vez mais sofisticados por forma a serem conseguidas as estruturas de muito alta dureza (com a boretação conseguem-se durezas da ordem de 2 000 unidades Vickers) fazendo o tratamento apenas nas zonas desejadas, evitando a oxidação das superfícies, distorcendo o mínimo possível as peças, e tornando os processos cada vez mais seguros para os operadores.

Têm igualmente sido desenvolvidos trabalhos de investigação no sentido de conferir aos aços a melhor estrutura para uma maquinabilidade ou uma capacidade de enformação óptimas, o que se pode conseguir também muitas vezes por tratamentos térmicos adequados.

A finalizar este capítulo, no qual se procurou chamar a atenção para os principais tipos de problemas que surgem nos tratamentos térmicos dos aços, faz-se notar qce continuam a desenvolver-se estudos quer para uma melhor elaboração dos aços já existentes (principalmente no sentido de lhes conferir a maior homogeneidade em toda a espessura dos perfis), quer para a criação de novos aços (é o caso, por exemplo, da criação ainda recente dos aços «maraging» que são ligas de Ferro e Níquel a que se juntam outros elementos tais como o Cobalto, o Molibdénio, o Alumínio, o Titânio e o Vanádio, sendo o teor em Carbono o mais baixo possível; nestes aços a transformação martensítica consegue-se mesmo em arrefecimento lento, promovendo-se seguidamente o endurecimento através da precipitação muito fina de compostos intermetálicos no seio da martensite por envelhecimento (aging) desta, e daí o nome dos aços).

2 — OS TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS EM PORTUGAL

Portugal importa anualmente várias dezenas, se não centenas, de milhares de contos de aços destina-

dos ao fabrico de peças a serem tratadas termicamente. Estes aços, pela sua cuidada elaboração e composição, são necessariamente caros, e tal facto, associado às grandes despesas em equipamento e mão-de-obra que o fabrico das diversas peças acarreta, justifica plenamente que se encare o problema do tratamento térmico com o maior cuidado. Infelizmente, muito poucas são no nosso País as empresas que dispõem de instalações convenientemente apetrechadas para o tratamento térmico dos aços que empregam e de pessoal devidamente preparado para esse efeito.

De um modo geral, os tratamentos são feitos com base apenas nas indicações de carácter genérico que os próprios fornecedores dos aços facultam, sendo raríssimos os casos em que se efectuam estudos com vista a optimizar os tratamentos. Não admira portanto que muitas peças tenham de ser rejeitadas logo após o tratamento térmico ou venham a ter duração muito curta em serviço, resultando daí grandes perdas para o País. Por outro lado não existe também ainda uma coordenação de esforços devidamente estruturada entre fornecedores e utilizadores dos aços de tratamento térmico por um lado e organismos de investigação por outro, capaz de permitir um ambiente de troca permanente de informações e de incentivação de resolução conjunta dos problemas.

Alguma coisa tem sido feita, no entanto, que poderá servir de base para Portugal se situar rapidamente ao nível de outros países nos quais associações especializadas, apoiadas em laboratórios devidamente equipados, incentivam continuamente o progresso nesta área promovendo congressos, cursos, seminários, publicações, periódicas ou não, etc. Uma ou outra publicação, de carácter genérico na maioria dos casos, tem sido editada quer por entidades públicas quer privadas, e uma ou outra actividade formativa tem sido também realizada. As actividades mais recentes consistiram na realização de um ciclo de seminários sobre tratamentos térmicos dos aços promovido pelo Grupo de Estudos da Tecnologia dos Aços de Construção Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, que teve a colaboração do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e do Centro de Mecânica e de Materiais das Universidades de Lisboa — CEMUL, num curto curso de tratamentos térmicos dos aços da iniciativa do Instituto de Soldadura, e num Curso de Especialização em Ciência dos Materiais organizado pela Universidade Nova de Lisboa. O CEMUL, recentemente criado, incluiu também nas suas linhas de acção o estudo dos tratamentos térmicos dos aços, tendo a decorrer um projecto de selecção de aços-ferramenta com vista à sua aplicação à indústria nacional em colaboração com o Laboratório de Metalurgia do Instituto Nacional de Investigação Industrial.

Há por conseguinte um certo número de pessoas interessadas em promover o desenvolvimento neste campo, sendo do maior interesse associá-las desde já para realizarem um trabalho conjunto. Este grupo seria de esperar que viesse a aumentar rapidamente pela adesão das pessoas que nas diversas empresas se preocupam com estes assuntos, bem como de técnicos das firmas fornecedoras quer dos aços quer do equipamento de tratamento térmico. Dado que as operações de soldadura dos aços implicam ciclos térmicos, é de esperar que as pessoas interessadas na soldadura também se venham a juntar a este grupo.

O autor da presente comunicação sugere que todas as pessoas interessadas sejam postas em contacto, de início, com base na Ordem dos Engenheiros, até se criar uma associação técnica autónoma a exemplo de outras nações, e sugere também que entre as tarefas primordiais a efectivar se inclua a incentivação da criação pelo Governo de uma oficina nacional de tratamentos térmicos dos aços, de preferência integrada no previsto Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, do Ministério da Indústria e Tecnologia, bem como da dotação do equipamento de investigação indispensável aos organismos que em Portugal têm por missão a investigação no âmbito da Ciência dos Materiais.

Tal oficina nacional teria como missão: suprir a falta de instalações adequadas ao tratamento térmico dos aços naquelas empresas públicas ou privadas que delas careçam, e em que muitas vezes não é rentável terem-nas, sendo preferível o recurso a meios externos; apoiar as empresas que dispõem de instalações de tratamentos térmicos na resolução dos seus problemas, quer efectuando estudos de optimização de determinados tratamentos, quer colaborando na manutenção de níveis adequados de trabalho através de cursos, estágios, etc., destinados ao pessoal dessas empresas, de vigilância do bom funcionamento do equipamento de medida e controlo, etc.; transmitir a organismos universitários de investigação aqueles problemas que transcendam os seus meios, dando a esses organismos o apoio possível na investigação a efectuar; criar e manter actualizados ficheiros com os quantitativos e custos de todos os aços importados, com base nos Serviços Aduaneiros Nacionais, por forma a racionalizarem-se as importações em presença das utilizações dadas no País a esses aços, podendo tal ficheiro, conjuntamente com a racionalização referida, vir a permitir uma futura tomada de decisão sobre a eventual criação de uma acearia de aços para tratamento térmico em Portugal.

NÚMERO 445/446 DEZEMBRO 1977/JANEIRO 1978 ANO LII/LIII VOLUME XXXIX

C. D. U. 622.792+622.798

A aglomeração de concentrados finos de minérios

H. MAIA E COSTA
Prof. Catedrático da F. E. U. P.

RESUMO

Nos modernos processos da metalurgia extractiva exigem-se cargas devidamente apropriadas de modo a conseguirem-se produtividades tão elevadas quanto possível e custos energéticos tão reduzidos quanto possível.

Neste trabalho indicam-se os processos de aglomeração mais difundidos mundialmente e que tem a sua maior aplicação na indústria siderúrgica: sinterização e peletização.

Trata-se depois de inventariar o que já existe em Portugal e quais as perspectivas futuras tendo em atenção os recursos nacionais em minérios de ferro.

ABSTRACT

In extractive metallurgy modern processes for preparing the charges are required in order to reach as high as possible productivity and as low as possible energetic costs.

In this work are indicated the more worldly widspread agglomeration systems and those that have their main application in the siderurgical industry: sintering and pelletizing.

After that an inventory of what already exists in Portugal is drawn up together with its future prospects, paying attention to the national resources in iron ore.

1 — INTRODUÇÃO

A necessidade de proceder ao enriquecimento dos minérios naturais, por razões de ordem económica levou à necessidade de instituir uma operação pré-metalúrgica que se designa por aglomeração. Com efeito, para se enriquecer há que proceder a fragmentações e por isso mesmo os concentrados serão produtos de pequena granulometria que para serem carregados nos fornos de redução terão de primeiramente ser aglomerados.

Embora normalmente se liguem as operações de aglomeração de concentrados à indústria siderúrgica uma vez que é aqui que as instalações atingem dimensões espectaculares e a técnica se encontra muito avançada, a aglomeração está generalizada e aplica-se à preparação das cargas para redução utilizando aparelhos com dimensões muito diversas. Assim, encontram-se instalações de aglomeração na apropriação de concentrados de sulfuretos (galenas, blendas, etc.) ao mesmo tempo que se promove a ustulação à morte, instalações essas por vezes apenas para algumas centenas de toneladas por ano, até instalações de muito grande dimensão para a alimentação de altos fornos que podem produzir algumas dezenas de milhar de toneladas por dia.

É na aglomeração de concentrados de minérios de ferro que se encontram as instalações gigantes embora noutros domínios se assista a um certo progresso nomeadamente na aglomeração de minérios de manganês.

Dentro da aglomeração de minérios de ferro a que dedicaremos o fundamental deste trabalho existem dois processos hoje generalizados no mundo e que são a sinterização e a peletização. Embora a peletização seja o processo industrial mais recente tem tido um desenvolvimento muito rápido mercê de por um lado haver a necessidade de enriquecer cada vez mais os produtos a carregar nos altos fornos a fim de diminuir o consumo específico de coque e por outro irem desaparecendo os minérios de dessiminação grosseira que obrigam, para que a libertação dos óxidos de ferro tenha lugar, a moagens extremamente finas. A aglomeração por sinterização, mais antiga no domínio industrial, tem sido objecto de grandes aperfeiçoamentos mercê de uma investigação profunda pelo que se manterá, enquanto dispuser de minérios com dimensões apropriadas, com produções superiores. Isto se deve ao facto de não só haver um grande número de instalações em produção mas tam-

Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

bém porque os «altofornistas» consideram que os «sinters» se mantêm na passagem através do alto forno mais uniformemente distribuídos, não se auto--segregando devido à sua forma extremamente irregular.

Será, no entanto, inevitável a substituição dos «sinters» pelas peletes à medida da exaustão dos minéios ricos obrigando à utilização de minérios pobres de dessiminação fina.

Porém, a peletização poderá vir a substituir a a sinterização mais cedo do que se pensa. Com efeito, um pouco por toda a parte no mundo industrializado se investiga a possibilidade de passar da siderurgia clássica (alto-forno, acearia a oxigénio) para uma siderurgia nova onde o alto-forno por razões económicas seja eliminado ficando em seu lugar aparelhos de redução no estado sólido. Os aparelhos que melhor se adaptam a este trabalho de pré-redução continuam a ser fornos de cuba, reduzidos à cuba propriamente dita e onde a carga é constituída exclusivamente por peletes e a redução se efectua com recurso a gases redutores. Quem mais terá a ganhar com o desenvolvimento desta nova siderurgia são os países em vias de desenvolvimento que possuindo com frequência minérios, gases naturais, produtos derivados do petróleo ou carvões não coquizáveis, que não consomem, poderão instalar mini-aceraias eléctricas para a produção do aço de que necessitam alimentando-as com peletes pré-reduzidas.

Estas poderão ainda substituir sucatas de aço com vantagens em muitos casos, principalmente porque, com facilidade, conduzirão a um produto de grande homogeneidade ao longo do tempo e sem o perigo da introdução de elementos por vezes nocivos que as sucatas com frequência contém.

*
* *

O trabalho que iremos desenvolver em seguida tem como finalidade dar a conhecer técnicas que se generalizaram no mundo siderúrgico e uma experiência pessoal adquirida ao longo do tempo quer em trabalho industrial, trabalho laboratorial ou visitas a instalações de pequena e grande capacidade.

2 — SINTERIZAÇÃO

Desde a instalação Greenwalt de Vila Cova com uma capacidade de cerca de 120 tons/dia de «sinter» até à instalação Dwight Lloyd de Dunquerque para uma produção de 16 000 tons/dia conhecem-se centenas de instalações com produções muito diversas. Todas se situam na proximidade do aparelho de redução a que os «sinters» se destinam uma vez que estes não podem ser transportados sem sofrerem degradações consideráveis. Com efeito, trata-se de um material muito duro parcialmente vitrificado que se degrada por abrasão, reduzindo-se a partículas de pequenas dimensões.

Embora fixos, semi-fixos ou móveis os aparelhos cujas bases são constituídas por grades de barras, são carregados com uma carga de minério, castinas e combustíveis de altura previamente definida obrigando-se a chama, após ignição com queimadores apropriados, a atravessar toda a carga, alimentando--se a combustão com ar aspirado inferiormente. Apesar de a quantidade de combustível ser pequena (4 a 6 % em peso da carga mineral) as temperaturas atingem 1400 e mesmo 1600° C, o que é suficiente para levar a carga a uma fusão incipiente o que provoca, pelo menos, a «colagem»» das partículas entre si.

A operação de sinterização é por isso uma operação de combustão de um combustível húmido com elevado teor em cinzas, usando vento como comburente, produzindo elevadas temperaturas, com obtenção de um produto poroso semelhante a uma escória, denominado sínter.

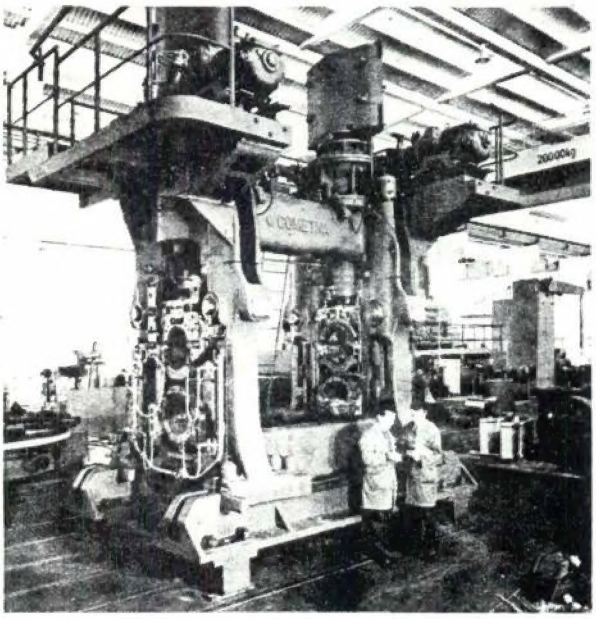
Para além da combustão haverá uma transferência de calor que se transmite da carga para o ar e deste de novo para a carga de modo a que, se tudo estiver bem regulado, a temperatura de ignição do combustível será atingida quando estiverem perfeitamente estabelecidas as condições de comburência.

Deste modo, devido à transmissão da combustão de cima para baixo, através da camada a aglomerar, e devido também à diminuição das perdas de calor para o exterior através das paredes do aparelho e através da zona superior já aglomerada, a temperatura da zona de combustão vai subindo à medida que o tempo decorre e só não atinge o valor máximo ao chegar à grelha de suporte porque esta é protegida por uma camada de aglomerado com 3 a 5 cm de altura (produzido numa operação anterior, de granulometria conveniente) e com uma capacidade calorífica suficiente para que a temperatura da grelha não ultrapasse os 500° C e se não deteriore rapidamente.

A investigação laboratorial dos fenómenos em jogo levou à conclusão de que haveria que aspirar um dado volume de ar, para se conseguir a aglomeração de uma dada carga, o qual era determinado não pelas necessidades da combustão mas sim pelas de transferência de calor. Assim se pode, em primeira aproximação, considerar a existência de um volume de ar específico para a aglomeração cujo peso é sensivelmente igual ao peso da carga a aglomerar. Tal facto pressupõe que os calores específicos da carga e do fluído aspirado sejam iguais o que não está longe da realidade.

Para que se possa promover a aspiração do ar necessário à operação num dado tempo, compatível com uma boa aglomeração, torna-se necessário que a carga tenha elevada permeabilidade ao ar e que seja por este atravessada quando se estabelece uma depressão inferiormente à grelha usando para o efeito um ventilador. O tempo para uma operação de aglomeração deverá ser determinado à «priori» e a partir do seu conhecimento poderá dimensionar-se a instalação a construir.

Das razões apontadas ressalta o facto de haver necessidade imperiosa de cuidar da apropriação da



FUNDIÇÃO DE AÇO E FERRO FUNDIDO

- ★ Aços ao carbono e de liga
- ★ Ferros fundidos lamelar e nodular (tipos Meehanite)
- ★ Corpos moentes (cylpebs e esferas)

FABRICOS ESPECIAIS

- ★ Material para caminhos de ferro
- ★ Equipamentos para cimenteiras
- ★ Equipamentos para siderurgias
- ★ Equipamentos para centrais de produção de energia
- ★ Equipamentos para pedreiras, minas, cerâmica e construção civil
- ★ Equipamentos para recolha e transporte de lixo
- ★ Válvulas industriais
- ★ Forjagem

COMETNA

COMPANHIA METALÚRGICA NACIONAL, S. A. R. L.

Rua da Academia das Ciências, 5 — Lisboa 2-Portugal
Telex: 12819 COMENA P — Phone: 32 00 11

FABRICOS

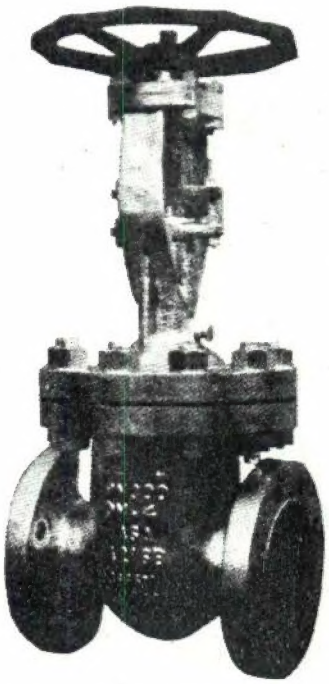
- ★ Válvulas de cunha
- ★ Válvulas de passagem
- ★ Válvulas de regulação
- ★ Válvulas de retenção
- ★ Manuais e motorizadas de acordo com normas DIN e ASA e especificações API

MATERIAIS

- — Ferro fundido
- — Grafite esferoidal
- — Aço carbono
- — Aços inox

PRESSÕES

- — DIN 2,5 a 40
- — ASA 150 a 300



SOCIEDADE PORTUGUESA DE VÁLVULAS, L.DA

Rua da Academia das Ciências, 5 — Lisboa - Portugal
Telex: 12819 COMENA P — Phone: 32 00 11

Letra design

Em 1978
a Companhia União Fabril
inaugura, no Barreiro, a maior
e mais moderna unidade produtora de alimentos
compostos, para animais, do País.

Esta unidade
integralmente comandada
por computador, produzirá, com a garantia
de qualidade Cuf-Sanders, 50 toneladas por hora,
que se traduzirão
num importante apoio à pecuária nacional.

CUF
SANDERS

COMPANHIA UNIÃO FABRIL, S.A.R.L.
DIVISÃO DE PRODUTOS PARA A PECUÁRIA

carga a lançar sobre o aparelho de aglomeração, apropriação essa que terá de ter em atenção a natureza e a composição granulométrica das substâncias minerais (minérios, castinas, retornos), a composição granulométrica e a quantidade dos finos de coque e ainda o teor em humidade e a altura da camada.

A modificação de qualquer destes factores implicará a modificação dos restantes a fim de procurar manter as características físicas da carga e consequentemente o tempo de aglomeração. Por isso mesmo é que a modificação da natureza e/ou granulometria do minério que é o componente principal da carga poderá ter uma influência enorme no decurso da operação, traduzida pelo tempo que a combustão leva a transmitir-se da zona superior à zona inferior. A diminuição da permeabilidade poderá obrigar a modificar a altura da camada e consequentemente da capacidade de produção da instalação.

Dado que, tal como dissemos mais acima, a tendência é para a produção de concentrados cada vez mais finos e como se torna bastante oneroso modificar as características das instalações, multiplicam-se os estudos laboratoriais conducentes à melhoria da permeabilidade das cargas a aglomerar. No fundo o que se procura é modificar um factor até certo ponto subjectivo e que os franceses intitulam como «aptidão à aglomeração». No fundo a «aptidão à aglomeração» dependerá da capacidade de as partículas mais finas formarem umas com as outras e com as de maior calibre fragmentos de maiores dimensões dando lugar a um empilhamento em que as partículas finas não colmatem os espaços existentes entre as partículas grosseiras. Tudo se deverá passar como se houvesse uma classificação mais cerrada das partículas constituitivas da carga. A melhoria da «aptidão à aglomeração» passará em primeiro lugar pelo doseamento correcto da humidade, por uma operação de mistura em aparelhos devidamente adaptados à obtenção dos efeitos enunciados e em última análise pela adição de um ligante à semelhança do que se faz em peletização.

Nas instalações siderúrgicas integradas usa-se com frequência como ligante o sulfato ferroso recirculado a partir de instalações de decapagem da chapa e também o «schlames» de lavagem dos gases dos convertidores de acearia. Os principais inconvenientes advêm da adição de S e compostos alcalinos.

No caso de estes produtos não poderem ser usados procede-se à substituição total ou parcial da castina por cal. Autores brasileiros conseguiram deste modo aumentar a capacidade de uma dada instalação em cerca de 40 %. Nas instalações laboratoriais da Faculdade de Engenharia foi possível por utilização de uma técnica semelhante melhorar a permeabilidade de uma camada de altura igual a 35 cm, obtida com minérios magnetíticos do Marão muito finos (70 % — 200 mesh) e de baixa aptidão à aglomeração, diminuindo assim o tempo da operação. Na transposição para a prática industrial foi possível aumentar a capacidade de instalação de aglomeração existente em cerca de 20 %. No entanto para a operação prévia de mistura não foi possível montarem-se os meios necessários e mais convenientes e daí a ocorrência de uma certa irregularidade de marcha. Na prática a melhoria considerável só poderia vir a obter-se se se conseguisse uma verdadeira micropeletização, num misturador devidamente adaptado, do produto a aglomerar.

A composição da carga deverá ser estabelecida tendo em atenção a obtenção de um leito de fusão para o alto-forno. Assim, da carga deverão fazer parte SiO_2, CaO, Al_2O_3 e MgO convenientes para o estabelecimento de uma escória qualitativa e quantitativamente adaptada à marcha do alto-forno. Os índices de basicidade CaO/SiO_2 e $\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$ deverão ser aproximadamente 1,2 e 0,9 respectivamente.

A temperatura a atingir-se durante a operação, deverá ser suficiente para a obtenção de um aglomerado resistente às acções de degradação tanto no exterior como no interior do alto forno mas, não tão elevada que provoque uma fusão total com formação de um produto compacto de baixa superfície específica e fundamentalmente pouco redutível. A redutibilidade dependerá fundamentalmente dos constituintes que resultarem da dissociação e combinação dos componentes da carga. Sob este ponto de vista haverá que ter em conta os constituintes que se formam não só por reacções no estado sólido como também aqueles que resultam da solidificação após fusão mais ou menos incipiente dos componentes.

A diminuição do potencial químico de oxigénio determinará dificuldades de redução o que se traduzirá por aumento do consumo de coque para a redução no alto forno. Por isso mesmo a temperatura deverá situar-se entre limites bem definidos sem o que ou o sinter se degradará facilmente ou se tornará pouco redutível.

3 — PELETIZAÇÃO

Muito diferente da sinterização, a peletização foi de início uma operação que procurava fabricar a partir de concentrados ricos e de calibre muito fino um produto de dimensões suficientes para carregamento directo nos fornos de redução. Na prática os produtos obtidos poderiam ser utilizados como se de minérios siliciosos e ricos se tratasse. Portanto, e diferentemente da sinterização, as peletes não poderiam por si só constituir um leito de fusão pois como possuíam um índice de basicidade muitíssimo baixo dariam lugar à produção de escórias muito viscosas e sem a capacidade depuradora que normalmente se lhes exige.

Actualmente ainda a maior parte das peletes produzidas são siliciosas tornando-se por isso necessário constituir leitos de fusão que as têm por base adicionando castinas ou sinters básicos. No entanto, em certas circunstâncias vão sendo produzidas peletes autofundentes que podem substituir total ou par-

cialmente os «sinters» e peletes pré-reduzidas com que se pretende enriquecer os leitos de fusão dos altos fornos, ou substituir total ou parcialmente as sucatas seja nos convertidores, como agente arrefecedor, seja nos fornos eléctricos, para a produção directa de aço.

O fabrico de peletes seja de que tipo for decorre em várias etapes bem distintas: preparação da carga por mistura dos constituintes (minérios e ligantes), fabrico das peletes em aparelhos de peletização propriamente ditos de que se destacam os discos e os tambores por serem até agora os mais usados, e cozedura das peletes com a finalidade de promover o endurecimento necessário ao seu transporte no exterior e no interior dos fornos. Para efectuar a cozedura os aparelhos mais usados são os fornos de cuba, as cadeias tipo Dwight-Lloyd, semelhantes aos aparelhos de sinterização e os fornos «grate-kiln», mistos de cadeia e forno rotativo.

Não vamos fazer o estudo de cada uma das etapes de fabrico uma vez que se trata de operações bem conhecidas dos engenheiros que se interessam por estes problemas. Interessa no entanto dizer que a finalidade é aglomerar partículas finas (80 a 90 % — 44 micra) de modo a obter bolas com um diâmetro médio de 10/12 mm, quando destinadas à carga do alto forno. Quando destinadas a acearia de conversão o diâmetro poderá crescer até cerca de 30 mm uma vez que se destinam a substituir fragmentos de minério rochoso, rico e denso. O fabrico das peletes resulta de um processo muito parecido com o da formação de bolas de neve. Assim, gotoletas de água caídas nos peletizadores dão lugar a núcleos que crescem à custa de outros ou de partículas secas sobre que rolam segundo mecanismos onde a tensão superficial da água desempenha papel relevante.

A cozedura tem por finalidade não a sinterização, isto é, a fusão das partículas e sua coalescência, mas sim uma recristalização, com ou sem oxidação, e formação de compostos no estado sólido. Daí que os constituintes observados nas peletes cozidas sejam muito diferentes dos observados nos «sinters». Assim, nas peletes são criadas pontes entre os grãos de óxido de ferro as quais são facilitadas se entretanto houver oxidação (caso em que a magnetite passe a hematite) ou são formados compostos entre os componentes das gangas ou dos ligantes e os próprios óxidos de ferro. De qualquer maneira os constituintes que envolvem elementos de ganga tem que formar uma rede contínua muito estável até à fusão. Com efeito, a resistência das peletes à compressão terá que ser encarada não só durante a sua movimentação no exterior dos fornos de redução mas principalmente no decurso da redução no seu interior. Na realidade a redução dos óxidos de ferro é realizada em grande parte no estado sólido pelos gases redutores CO e H_2 dando lugar à formação de glóbulos de ferro muitas vezes isolados no seio das peletes. A rotura das pontes entre partículas de óxido de ferro promoveria a diminuição da resistência das peletes aos esforços de compressão e abrasão (atrito) a que estão sujeitas quando a temperatura se situa entre os 1000 e os 1200° C em meio redutor. Daí que pudesse ocorrer o seu esmagamento, redução a pó fino e seu transporte pelos gases. Nessas zonas do forno desempenha papel fundamental a ligação escória que só desaparece quando da fusão. Por isso, o teor em ferro das peletes terá um limite superior a não ultrapassar e que deverá ser determinado em ensaios laboratoriais de redutibilidade.

As peletes autofundentes têm em geral um teor em ferro mais baixo que as peletes ácidas fabricadas com o mesmo minério pois, haverá que adicionar uma quantidade de ligantes suficiente à base de OCa para o estabelecimento de um índice de basicidade conveniente sempre muito mais elevado que o das peletes ácidas.

A cozedura destas peletes é mais difícil uma vez que terá de decorrer entre limites de temperatura mais apertados, determinados pela maior facilidade de fusão dos constituintes formados a partir da SiO_2 e CaO.

As peletes pré-reduzidas começaram por ser na maior parte dos casos peletes ácidas que são em seguida reduzidas em aparelhos onde circulam gases redutores a temperaturas convenientes mas que normalmente não ultrapassam os 1200° C. No entanto, outros processos são aplicáveis com recurso a combustíveis sólidos e líquidos. Os combustíveis sólidos podem ou ser misturados com as peletes e aquecidas em conjunto a fim de se produzir a atmosfera conveniente para, à temperatura de trabalho, se realizar a redução, ou serem mesmo incorporados na mistura, previamente à peletização, ocorrendo a pré-redução quando da cozedura. Experiências laboratoriais permitem antever um progresso notável nestas técnicas.

Por fim não queremos deixar de referir que na evolução técnica da peletização surgiu recentemente o processo Grangcold. Utilizado na aglomeração de minérios de magnetite de mina sueca de Grangsberg no processo Grangcold há apenas a considerar as fases de mistura e de peletização. Com efeito, o processo surgiu com a finalidade de evitar a fase mais cara que é justamente a cozedura. Neste processo o ligante pode ser cimento Portland ou cal hidráulica em vez de bentonite. No entanto, a quantidade de ligante que no caso de utilização da bentonite atingirá no máximo 1 % aqui pode atingir 10 %. Por outro lado as peletes terão de ganhar presa, tal como acontece nas obras de betão, e por isso deverão ser deixadas em parque durante pelo menos quatro dias. Só após esse tempo de repouso, durante o qual se dá o endurecimento com um aumento de resistência à compressão notável, elas serão susceptíveis de manipulação.

Este processo tem do ponto de vista económico enorme interesse uma vez que os investimentos para a produção deste tipo de peletes são muito inferiores aos das instalações normais. No entanto, parece que os inconvenientes são bastantes para não permitir, pelo menos a curto prazo, a sua generalização. De acordo com algumas informações que conseguimos colher o inchaço que sofrem estas peletes em curso de redução é muitíssimo elevado o que pode provocar

acidentes de marcha semelhantes aos causados pela subida do teor em elementos alcalinos na carga.

Daí que a carga dos altos fornos não tenha ainda podido contar com mais de 15 % de peletes grangcold.

É curioso notar que peletes deste tipo foram talvez usadas industrialmente pela primeira vez em Portugal entre 1960 e 1967. Na realidade após uma fase inicial em que o forno Tysland Hole de Vila Cova do Marão usou um leito de fusão frio constituído por sinter, procedeu-se à sua transformação que no essencial consistiu na montagem de chaminés para carga, pré-aquecimento e pré-redução. Simultaneamente e porque se pretendia obter uma gusa de mais baixo teor em fósforo foi preciso purificar o minério moendo-o mais fino e reconcentrando-o. Como a sinterização se não adaptava a este novo tipo de concentrado foi necessário montar uma instalação de peletização. A mistura para a obtenção das peletes era constituída por minério, carvão finamente moído e cimento que, na proporção de cerca de 10 %, actuava como ligante. Estas peletes eram também armazenadas durante 4 ou mais dias a fim de endurecerem e virem a ser em seguida pré-aquecidas e pré-reduzidas ao caminharem para o forno. É curioso notar que este sistema raramente funcionou correctamente devido ao encravamento das chaminés de carga. Embora se não tivesse determinado com rigor as razões do encravamento hoje podemos suspeitar ter sido o inchaço das peletes que o provocava.

Actualmente produzem-se em Vila Cova peletes grangcold usando como ligante cimento na proporção de 8 %. Estas peletes após repouso de 5 a 7 dias poderão ser manipuladas e carregadas no forno eléctrico sem problemas de degradação notável.

4 — AGLOMERAÇÃO EM PORTUGAL

As instalações de que se dispõe actualmente são:

a) Sinterização na fábrica do Seixal da Siderurgia Nacional — Trata-se de uma cadeia tipo Dwight-Lloyd com uma capacidade de aproximadamente 250 000 tons/ano;

b) Sinterização na fábrica de Vicominas em Vila Cova do Marão. Cuba fixa Greenawalt com uma capacidade diária de $\simeq$ 100 tons (considerando os concentrados ali produzidos);

c) Peletização usando dois discos de 4,5 m de diâmetro em Vila Cova do Marão para a produção de peletes grangcold e com uma capacidade de 60:70 tons/hora.

Portanto uma capacidade de aglomeração insignificante.

No caso de Vila Cova do Marão a capacidade é excedente tendo em atenção o consumo do forno de redução. No entanto se a industrialização do País se vier a processar e o consumo de ferro fundido subir para valores próximos dos europeus a capacidade de aglomeração disponível poderá vir a ser aproveitada.

No caso do Seixal a capacidade de aglomeração é insuficiente para alimentar o alto-forno. Daí que haja necessidade de carregar minérios em bocados que o País importa.

5 — PERSPECTIVAS

De momento está por aproveitar o jazigo de Moncorvo cujas reservas são vultuosas. Elas devem ascender a 200 milhões de toneladas de concentrados com cerca de 64 % de Fe. Dado que se torna necessário moer o minério bastante fino (100 % — 80 μ) para o concentrar, o único processo de aglomeração aplicável será a peletização. De momento ainda se não conhece qual o tipo de peletes a fabricar: ácidas ou autofundentes. Tal só se tornará possível quando se fizerem ensaios para se determinarem as características de um e outro tipo e quando se fixar em definitivo o local de implantação da instalação. Até lá no entanto parece-nos que há um longo caminho a percorrer, só não se compreendendo que a era das viagens interplanetárias esse caminho não seja percorrido em curto espaço de tempo.

6 — INSTALAÇÕES LABORATORIAIS

Do nosso conhecimento apenas existem na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto aparelhos laboratoriais de aglomeração dimensionados para, a partir deles, se tirarem elementos suficientes para que da transposição para a escala industrial não surjam surpresas desagradáveis.

A cuba de sinterização permite trabalhar com altura de carga até 50 cm e está equipada com dispositivos de medição e registo de temperatura e depressão aos diferentes níveis de carga. Vários processos de mistura são disponíveis a fim de se estudar a sua influência na permeabilidade a frio e durante a aglomeração. A instalação é bastante flexível e permite obter depressões até 1350 mm de coluna de água.

Os sínters são analisados visualmente e metalograficamente estando em curso de montagem uma instalação para determinação da reductibilidade, inchaço e resistividade a frio e quente.

Nesta instalação foram feitos ensaios de sinterização de minérios de ferro de Vila Cova com o fim de procurar melhorar a capacidade de instalação industrial. Mais recentemente têm sido realizados ensaios de aglomeração dos finos de minério de manganês e das escórias da metalurgia do ferro manganês, com a finalidade de determinar a sua aptidão à aglomeração e a composição da carga em combustível, teor em humidade, etc.

Sobre estes «sinters» realizam-se os ensaios habituais já disponíveis pensando-se a curto prazo desenvolver os ensaios de redutibilidade, inchaço e resistividade.

Quanto à peletização dispõe-se de dois discos um de 20 cm de diâmetro e outro de 100 cm de diâmetro. Este dispõe de 3 margens a fim de se lhe aumentar

a flexibilidade. Com efeito, quando foi construído admitia-se que o processo de flutuação viesse a impor-se na concentração das hematites e que houvesse a necessidade de fabricar peletes envolvidas em finos de coque. Nesta instalação de dimensão piloto podem fabricar-se peletes de diversos calibres uma vez que é permissível alterar o débito da alimentação, o débito de água, a velocidade e a inclinação do disco.

As peletes são ensaiadas em verde à compressão, à queda e aos choques repetidos ao mesmo tempo que se determina o teor em humidade. A sua cozedura se necessária, faz-se na cuba de sinterização por meio de gás. As peletes cozidas são ensaiadas à compressão e observadas macro e microscopicamente.

Nesta instalação foi recentemente realizado o ensaio de peletização do minério de Vila Cova pelo processo grangcold, com pleno êxito. A transposição do processo para a escala industrial não ofereceu quaisquer dificuldades nem houve grandes surpresas.

Nesta mesma instalação se tem investigado o processo de fabrico das peletes pré-reduzidas por incorporação de finos de coque na mistura. Os resultados são de molde a que se prossiga. No entanto, torna-se necessário instalar um forno rotativo de cozedura e pré-redução, pois até aqui estas operações têm sido realizadas em cadinho sem possibilidade de controlo rigoroso de temperatura e de atmosfera gasosa o que provoca a formação de cachos. No entanto o grau de redução é muitíssimo elevado.

7 — CONCLUSÕES

Pretendemos apenas apresentar a aglomeração de uma maneira genérica uma vez que nos pareceu ser um congresso deste género pouco propício, para já, à aceitação de trabalhos de investigação numa faixa de conhecimentos necessariamente estreita.

Foi também nosso propósito informar o que já existe, o que deveria existir e quais as perspectivas.

Pelo que fica dito a peletização será o processo de aglomeração que de acordo com o que se conhece virá a ser implantado no mundo, cada vez em maior escala. Será também o processo susceptível de vir a ser instalado em Portugal para aproveitamento dos jazigos de ferro actualmente conhecidos.

A aglomeração por sinterização terá maior possibilidade de se desenvolver entre nós, aplicada a finos de minérios de manganés e às escórias da metalurgia do ferro-manganés.

NOTICIÁRIO

• Ponte sobre o rio Guadiana em Vila Real de Santo António

O projecto da ponte internacional sobre o rio Guadiana entre Vila Real de Santo António e Aymonte encontra-se concluído, tendo sido já entregue na Junta Autónoma de Estradas.

A aprovação do projecto pelos Governos dos dois países terá lugar, conforme disposição do convénio luso-espanhol, em face da sua apreciação pela Comissão Técnica Mista Luso-Espanhola, cuja reunião já foi solicitada pela representação portuguesa.

A presente obra é constituída, para além da ponte propriamente dita e que é encargo dos dois países, por um extenso viaduto na parte portuguesa de cerca de 500 metros, ao qual se seguem cerca de 6 quilómetros de estrada com características de via rápida e que fará a ligação à E. N. 125 que actualmente costeia o Algarve. Simultaneamente serão edificadas as respectivas instalações alfandegárias. Os projectos das obras complementares encontram-se prontos e prestes a serem aprovados superiormente.

Espera-se que esta obra seja iniciada no presente ano, prevendo-se a sua conclusão em 1980, satisfazendo assim uma das grandes aspirações da população algarvia.

O projecto que vai agora ser entregue à Direccion General de Carreteras, da autoria do Prof. Edgar Cardoso, compreende o estudo de duas soluções estruturais, com vãos intermédios de 130 metros e extremos de 85 metros.

A solução A caracteriza-se por a superestrutura ser constituída por 5 quadros ou pórticos fechados com 90 metros de envergadura total, em forma de trapézio, com a base maior para cima e prolongada em consola para um e outro lado, a fim de receber 6 tramos simplesmente apoiados, com 40 metros de vão.

A solução B é constituída por uma superestrutura tipo viga contínua, ou mais exactamente, pórtico múltiplo apoiado em livre dilatação condicionada no encontro do lado de Espanha e um pilar de transição do lado de Portugal e encastrado em 5 pilares gémeos flexíveis.

Para qualquer das soluções são apresentadas três hipóteses de fundação indirecta: poços cavados por havage, estacas verticais de betão armado, moldado no local, de grande diâmetro (2,00 m), estacas cravadas verticais inclinadas, com entubamento metálico depois cheio de betão armado, de médio diâmetro (1,00 m).

São os seguintes os custos orçamentados para as duas soluções estruturais:

Solução A (fundações indirectas em poços), 298 000 000$00 — alternativa AV1; fundações indirectas em estacas — grande diâmetro, 310 000 000$00 — alternativa AV2; (fundações indirectas em estacas — médio diâmetro, 316 000 000$00.

Solução B (fundações indirectas em poços), 296 000 000$00 — alternativa BV1; (fundações indirectas em estacas — grande diâmetro), 312 000 000$00 — alternativa BV2; (fundações indirectas em estacas — médio diâmetro), 320 000 000$00.

(Informação de «O Primeiro de Janeiro», de 24-1-78)

NÚMERO 445/446 DEZEMBRO 1977/JANEIRO 1978 ANO LII/LIII VOLUME XXXIX

C. D. U. 669.1:543.42.64

Determinação de coeficientes de repartição sólido/líquido em ligas ternárias Fe-Mn-C

M. HELENA DE MELO CARVALHO (1)

RESUMO

Usando a técnica de análise por microsonda, determinaram-se coeficientes de repartição sólido/líquido para algumas ligas da região rica em Fe do sistema Fe-Mn-C. O método utilizado envolveu a microanálise de amostras temperadas a partir de temperaturas de equilíbrio na região L+γ.

ABSTRACT

Solid/liquid partition coefficients of some Fe-Mn-C alloys, at the Fe — rich corner, have been determined by means of electron probe microanalysis. The method used involved the microanalysis of specimens quenched from an equilibrium temperature in the L+γ field.

1 — INTRODUÇÃO

O conhecimento dos valores experimentais dos coeficientes de repartição é muito importante em quaisquer estudos de solidificação. No caso dos sistemas binários, esses valores podem ser obtidos a partir dos correspondentes diagramas de equilíbrio. Já para os sistemas ternários, os coeficientes de repartição só podem ser calculados a partir dos diagramas de equilíbrio quando estes incluem as linhas de conjugação («tie-lines»), o que geralmente não acontece visto que as técnicas clássicas empregadas no estudo de diagramas não permitem a obtenção dessas linhas [1], [2].

Uma das aplicações possíveis da análise por microsonda electrónica em estudos de diagramas de equilíbrio é precisamente a determinação das linhas de conjugação. Contudo existe muito pouca informação publicada sobre o assunto, nomeadamente no que respeita ao equilíbrio sólido/líquido, onde o emprego da microsonda é presentemente a única técnica experimental disponível.

O estudo do equilíbrio sólido/líquido em ligas ternárias de Fe-X-C tem sido objecto de particular interesse, tendo sido já publicados dados relativos a coeficientes de repartição nos sistemas Fe-Cr-C [3 a 7] e Fe-Ni-C [8]. O presente trabalho destinou-se a iniciar a obtenção de dados similares para o sistema Fe-Mn-C.

A técnica utilizada consistiu em determinar, através da microanálise, a composição das fases sólida e líquida, em equilíbrio, presentes a uma temperatura situada na região (sólido + líquido), em amostras temperadas a partir dessa temperatura. A região estudada foi limitada à (líquido+γ) e os coeficientes de repartição do manganês e do carbono — Ko(Mn) e Ko(C), respectivamente — calculados a partir das composições assim obtidas.

2 — EXPERIMENTAÇÃO

2.1 — Ligas

De uma série de ligas inicialmente preparadas, com composições destinadas a cobrir de uma maneira sistemática a região rica em Fe do diagrama Fe-Mn-C, seleccionaram-se as de composição nominal indicadas na tabela I.

(1) Assistente especialista do Laboratório de Física e Engenharia Nucleares, Sacavém.

Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

TABELA I — **Composição das ligas**

N.º de referência	Composição nominal (% em peso)	Composição real (% em peso) *	
		C	Mn
1	0,35 C — 2 Mn	0,34 ± 0,01	2,11 ± 0,02
2	1,00 C — 2 Mn	0,96 ± 0,01	2,07 ± 0,02
3	1,60 C — 2 Mn	1,55 ± 0,02	2,05 ± 0,02

* Si $<$ 0,02 %

As ligas foram preparadas em forno de indução de 2 Kg, em vácuo, a partir de ferro e manganês electrolíticos e de varões de grafite de alta pureza, e a partir delas obtidos varões com 16 mm de diâmetro dos quais se maquinaram os provetes necessários. A composição final do material, na forma de provetes maquinados, encontra-se também na tabela I.

A forma e dimensões dos provetes foram especificamente condicionadas pela geometria do sistema montado para os ensaios com têmpera em bloco de cobre arrefecido. Por uma questão de uniformidade, foi utilizado também o mesmo tipo de provetes nos ensaios com têmpera em água.

2 2 — Aparelhagem

Utilizou-se uma montagem experimental especialmente preparada para trabalhar em estudos de solidificação [7] e que consistia essencialmente num forno de tubo vertical com possibilidade de circulação de argon e permitindo efectuar têmperas directas.

O forno, com tubo de mulite e elementos de aquecimento de carboneto de silício, podia atingir temperaturas até 1600° C. A temperatura avaliava-se por meio de um termopar associado a um controlador que permitia manter a zona quente a menos de 0,5° C do valor desejado.

Quanto às têmperas a efectuar, foram utilizadas as duas técnicas designadas por A e B, a seguir descritas:

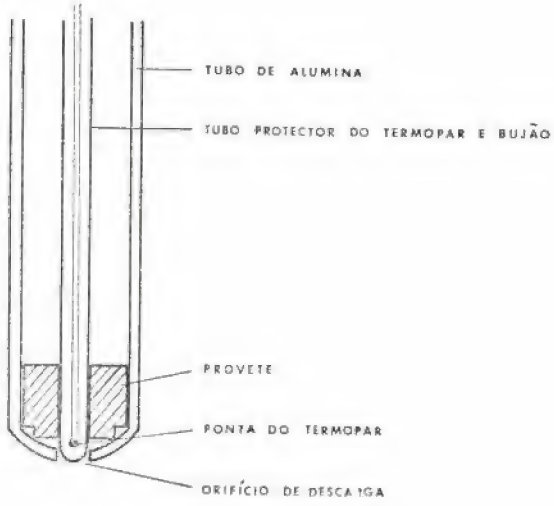


Fig. 1
Montagem do provete para têmpera em bloco de cobre arrefecido

A — Têmpera em bloco de cobre arrefecido

A têmpera efectua-se sobre um bloco de cobre composto de duas partes articuladas e provido de refrigeração a água, situado abaixo da boca do forno. A parte inferior do bloco é mantida estática e a superior cai sobre a inferior logo que as primeiras gotas de metal nela se depositam.

O provete a ensaiar e um tubo fino de alumina que vai actuar como protector do termopar e também como bujão («stopper») são introduzidos num tubo de alumina mais largo provido de um orifício de descarga, tal como se mostra na figura 1.

Este conjunto permite colocar o provete no centro da zona quente do forno, através de uma montagem em que se fixa ao topo superior do tubo largo de alumina uma peça de latão refrigerada a água, obtendo-se assim uma montagem rígida que, quando apoiada numa plataforma de fibrocimento colocada a uma dada altura fixa em relação ao tubo do forno, irá selar o extremo superior deste. Essa peça de latão dispõe também de uma tubagem que permite a circulação de argon purificado dentro do tubo que contém o provete. O extremo inferior do tubo do forno é fechado por meio de uma outra peça metálica refrigerada a água e provida de uma tampa deslizante.

A têmpera efectua-se removendo essa tampa e levantando o bujão. A massa fundida ao cair acciona um sistema que força a parte superior do bloco de cobre a cair sobre o metal entretanto depositado na parte inferior, contribuindo assim para que o metal se espalhe mais rápida e uniformemente, o que conduz a uma têmpera mais eficiente.

Este tipo de têmpera é utilizado para temperaturas de ensaio para as quais o material fundido é suficientemente fluido para permitir uma descarga eficiente. Das fases sólida e líquida em equilíbrio à temperatura ensaiada resultam, na amostra obtida por têmpera, aquilo a que designaremos por «sólido» e «líquido». A estrutura deste «líquido» é bastante fina e permite uma fácil determinação da sua composição média, ao contrário do que acontece no «líquido» obtido por têmpera em água.

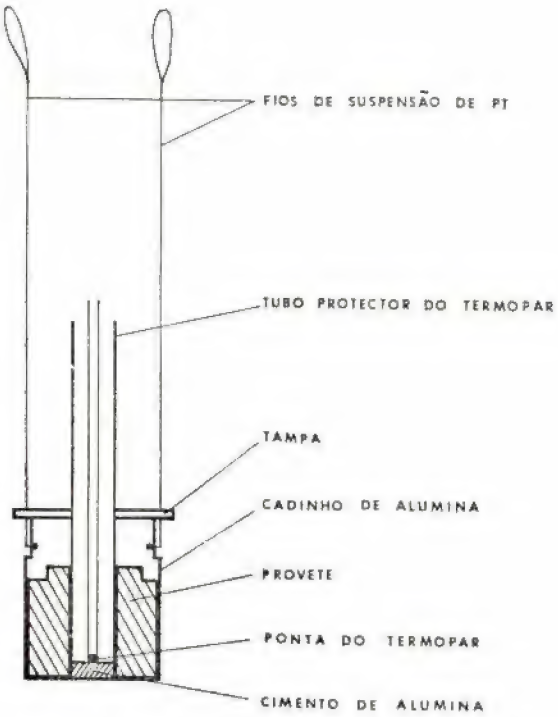


Fig. 2
Montagem do provete para têmpera em água

B — Têmpera em água

O provete é introduzido num cadinho de alumina ao qual se adapta uma tampa e, centrado nesta, um pequeno tubo de alumina destinado a proteger a ponta do termopar (fig. 2).

O cadinho é suspenso, por meio de fios de platina, do extremo superior de um tubo de alumina, idêntico ao tubo largo citado em A, e este adaptado ao tubo do forno tal como se referiu anteriormente.

A têmpera efectua-se deixando-se cair o cadinho num recipiente contendo água, colocado por debaixo do forno.

Este tipo de têmpera é normalmente associado a temperaturas de ensaio relativamente próximas do solidus, para as quais o material fundido já não apresenta grande fluidez. A estrutura do «líquido» obtido é geralmente grosseira, dificultando a determinação da sua correcta composição, mas por outro lado, uma vez que a amostra obtida por têmpera representa o total da massa fundida, é possível efectuar sobre ela a determinação das percentagens de fase «sólida» e «líquida» presentes, que serve de verificação às composições de equilíbrio determinadas pela microanálise.

2.3 — Ensaios

Depois de efectuada a montagem correspondente ao tipo de têmpera a realizar, fazia-se passar uma corrente de argon no forno, durante cerca de 20 minutos, antes de o ligar. O provete era então aquecido e fundido, mantendo-se neste estado durante 20 minutos, ao fim dos quais a temperatura era descida lentamente até uma temperatura dentro da região (sólido + líquido), mantida nesse valor durante o período de tempo necessário para se atingir o equilíbrio e depois se fazia a têmpera. O fluxo de argon era mantido durante todo o ensaio e reforçado um pouco, imediatamente antes da têmpera.

Para cada uma das diferentes ligas estudadas houve necessidade de fazer sempre um primeiro ensaio a fim de determinar a temperatura «liquidus» correspondente à respectiva composição, a partir da curva de arrefecimento.

As temperaturas foram determinadas usando termopares de Pt-Pt/13 % Rh, calibrados a 900° C contra um termopar padrão.

Para os tempos de 2 horas geralmente usados, as distâncias(*) correspondentes a equilíbrio controlado por um mecanismo de difusão são, para o Mn, da ordem dos 120 μm na fase sólida e 12 mm na fase líquida. Os valores dos coeficientes de difusão do manganês usados neste cálculo — $D = 5 \times 10^{-9}$ cm²/seg na fase sólida γ e $D = 5 \times 10^{-5}$ cm²/seg na fase líquida — foram respectivamente calculado, para uma temperatura e composição médias, a partir de uma expressão dada por Wells e Mehl [9] e tomado como o valor típico para metais líquidos referido por Chalmers [10]. Previa-se então daqui que partículas de «sólido» de diâmetro igual ou inferior a 120 μm e respectivo «líquido» adjacente estariam em equilíbrio em termos de Mn e por maioria de razão em C, sendo portanto adequadas para a microanálise.

2.4 — Amostras para a microanálise

2.4.1 — Seleccionaram-se como padrões para as determinações de Mn e C, respectivamente:

— Uma pequena porção de varão da liga 3 (com dimensões adequadas à montagem num porta-padrões convencional) que foi encapsulada num tubo de sílica, em argon a aproximadamente 1/3 de atmosfera, homogeneizada a 1150° C durante duas semanas e temperada em água.

— Uma amostra obtida de um ensaio em que se fez uma têmpera, em bloco de cobre arrefecido, de material dessa mesma liga 3, a partir de uma temperatura acima da de fusão.

Porções de ambos os padrões foram novamente analisadas tendo-se confirmado que mantinham a

(*) $X = 2(Dt)^{1/2}$ onde X é a distância de penetração, num dado meio e no tempo t, de um elemento com coeficiente de difusão D nesse meio.

composição referida no quadro I e o resto montado, com pasta condutora de prata, em pequenos aros de aço de 5 mm de diâmetro. Foram depois submetidos a um polimento convencional até pasta de diamante de 1/4 μm, acabamento com alumina γ, lavagem com água e álcool e secagem.

O uso de padrões de ligas quer para o Mn quer para o C, em vez de padrões de elementos puros, justifica-se aqui pelo baixo teor destes elementos nas amostras a analisar. A utilização de padrões de composição próxima da do material a analisar é particularmente importante no caso do carbono, dado que a grande diferença em número atómico entre este e os restantes elementos da matriz exigiria uma larga correcção, de eficiência duvidosa, se se usasse um padrão de elemento puro.

2.4.2 — De cada ensaio com têmpera A resultaram várias porções de metal com espessuras da ordem dos décimos de milímetro; dessas porções seleccionaram-se duas ou três que se montaram em conjunto a fim de constituirem uma amostra para a microanálise. De cada ensaio com têmpera B, a amostra para a microsonda obteve-se por montagem de metade da amostra resultante, cortada longitudinalmente. Como material de montagem utilizou-se normalmente baquelite condutora, de ferro.

As amostras foram, em ambos os casos, polidas como se descreveu em relação aos padrões e contrastadas depois ligeiramente com uma solução de metabissulfito de sódio a 35 %, a fim de revelar as fases «sólida» e «líquida». Uma vez escolhidas as áreas e direcções adequadas à análise por microsonda, assinalaram-se com marcas de microdureza, e retirou-se o contraste pela repetição da parte final do polimento a partir da pasta de diamante de 1/4 μm.

Nas figuras 3 e 4 apresentam-se exemplos de microestruturas típicas obtidas.

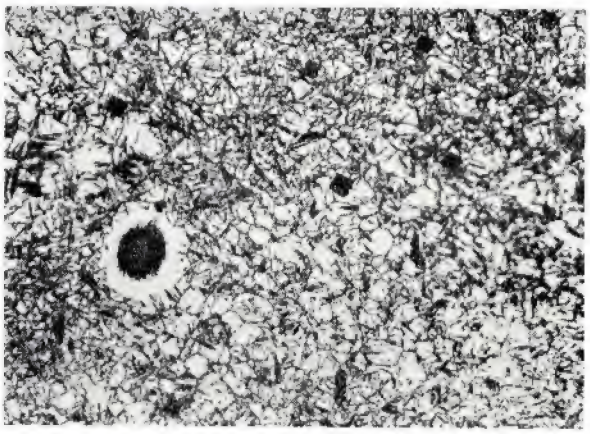


Fig. 3

Liga 3. Têmpera A, a partir de 1396,5° C. Contrastação com $S_2O_5Na_2$ a 35 %. Ampliação 100 x

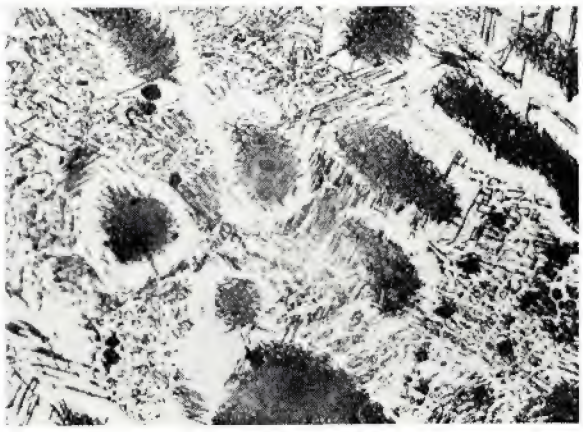


Fig. 4

Liga 3. Têmpera B, a partir de 1386° C. Contrastação com $S_2O_5Na_2$ a 35 %. Ampliação 100 x

2.5 — Análise com microsonda electrónica

Utilizou-se uma microsonda MICROSCAN Mk 5 da Cambridge Instruments, com 2 espectrómetros dispersores de comprimento de onda, trabalhando-se sempre com uma tensão de excitação de 20 KV e uma corrente de feixe que produzia uma corrente de $0{,}5 \times 10^{-6}$ ampères num padrão de ferro puro.

Para ambos os elementos, Mn e C, a radiação medida foi a K. A cada elemento foi atribuído um dos dois espectrómetros, usando-se para o MnK_α um contador selado e um cristal analisador de fluoreto de lítio e para o CK um contador de fluxo, com uma mistura de argon/70 % metano, e um pseudo-cristal de estearato de bário.

O pico Mn K_α foi sempre localizado na amostra a analisar e o CK num padrão de grafite. O fundo, quer para o manganês quer para o carbono, era medido num padrão de ferro.

Para o CK usou-se o dispositivo discriminador a fim de excluir eventuais interferências por parte de reflexões de ordem elevada dos elementos pesados, nomeadamente a de 2.ª ordem do pico MnL1. Usou-se também sempre o dedo de refrigeração («cold finger») a fim de evitar, ou pelo menos reduzir, a contaminação devida ao carbono, durante a análise. Tendo-se verificado [11] que a taxa de contaminação quando o dedo de refrigeração está em operação é a mesma quer este esteja colocado directamente sobre a amostra quer não, foi esta última posição a usada durante todo o trabalho uma vez que permitia uma mais fácil utilização do sistema óptico da microsonda.

A maior parte dos valores experimentais obtidos foi retirada de registos gráficos correspondentes a varrimentos pontuais («point scans» — varrimentos em que o feixe de electrões está fixo e a amostra se move mecanicamente ao longo de uma dada direcção), provenientes de um registador de 3 canetas que possibilitava o registo simultâneo das intensidades Mn K_α e CK e ainda a monitoração da intensidade de corrente na amostra.

2.5.1 — Sobre os padrões referidos em 2.4 efectuaram-se varrimentos pontuais tendentes a avaliar da sua microheterogeneidade, tendo-se verificado ser esta desprezável.

2.5.2 — Em cada amostra efectuaram-se varrimentos pontuais através de três ou mais partículas de «sólido». Utilizou-se uma velocidade de 30 μm/min. e cada varrimento começava geralmente numa área de «líquido», atravessava diametralmente uma partícula de «sólido» e acabava em «líquido» novamente, sendo os comprimentos totais assim varridos da ordem dos 500 μm. As partículas analisadas tinham sempre dimensões da ordem dos 100-150 μm, excepto quando se procurou deliberadamente verificar se a composição do «sólido» em manganês variava ou não com a dimensão das partículas, dentro de determinados limites.

Cada varrimento nas amostras era seguido de outros menos extensos, à mesma velocidade, nos padrões de Fe, de Mn e de C. Nos casos em que a intensidade da corrente na amostra se mantinha particularmente estável, este procedimento apenas se levava a cabo no início e no fim da série de varrimentos efectuada numa mesma amostra.

Nas figuras 5 a 7 apresentam-se alguns dos registos típicos assim obtidos.

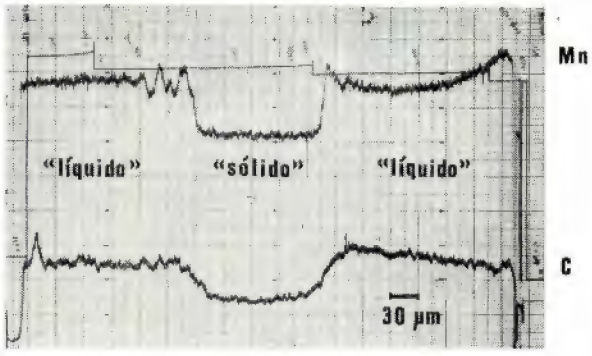


Fig. 5

Liga 3. Têmpera A, a partir de 1396.5° C

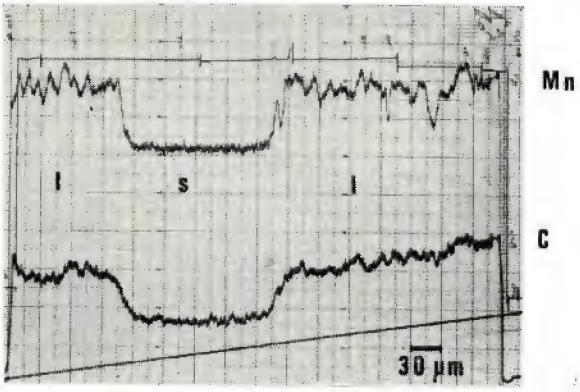


Fig. 6

Liga 3. Têmpera A, a partir de 1397° C

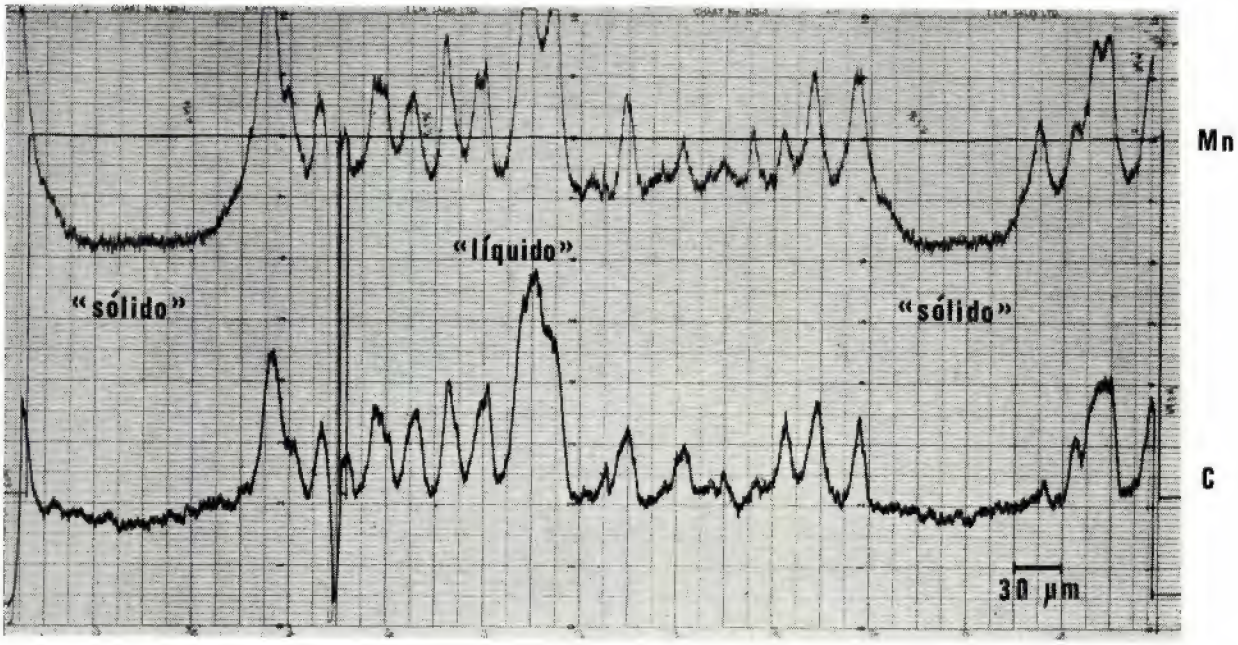


Fig. 7

Liga 3, Têmpera B, a partir de 1386° C

A partir dos registos calcularam-se os valores de:

(i) Coeficiente de repartição do manganês — Ko (Mn)

$$Ko\,(Mn) = \frac{\text{Int. Mn } K_\alpha \text{ no «sólido»}}{\text{Int. Mn } K_\alpha \text{ no «líquido» adjacente}}$$

Entende-se por intensidade do pico Mn K_α no «sólido», a intensidade constante medida no patamar correspondente ao atravessamento das partículas «sólidas» deduzida do fundo medido no padrão de ferro e corrigida para o tempo morto.

Entende-se por intensidade do pico Mn K_α no «líquido» a média dos valores da intensidade lidos na parte do registo correspondente ao «líquido» todos os 15 μm, entre uma distância de 50 μm e uma de cerca de 150 μm para cada lado da partícula «sólida», média essa corrigida para o fundo e para o tempo morto. O facto de se terem desprezado os valores incluídos nas referidas distâncias de 50 μm mais próximas do «sólido» justifica-se pela necessidade de evitar incluir na média calculada valores de intensidade que poderiam estar afectados por efeitos artificiais de têmpera [5].

(ii) % Mn no «sólido» e no «líquido»

Nas amostras provenientes de têmpera A onde a segregação no «líquido» é mínima, a média das intensidades não corrigidas de Mn K_α no «líquido» calcula-se facilmente e dá valores concordantes qualquer que seja a direcção em que o «sólido» é atravessado. Por outro lado, a intensidade não corrigida de Mn K_α nos patamares correspondentes a partículas «sólidas» mantém-se constante, não variando com o tamanho destas até pelo menos 200-250 μm. Consequentemente, esses valores de Mn K_α, depois de corrigidos para o fundo e para o tempo morto, foram usados no cálculo da percentagem de Mn no «líquido» e no «sólido», assumindo-se uma relação linear entre a intensidade da radiação X e a concentração do elemento e usando-se como padrão de Mn o referido em 2.4.

Nas amostras provenientes de têmpera B, quer a pequena percentagem de «líquido» presente quer a estrutura dendrítica grosseira nele desenvolvida contribuem para tornar difícil a obtenção de valores médios correctos de Mn K_α no «líquido», quando se utiliza um varrimento pontual. Nestes casos, a intensidade Mn K_α no «líquido» usada quer na determinação da % de Mn quer na determinação de Ko (Mn) foi obtida através de medições associadas a varrimentos de área («rasters»-varrimentos feitos com a amostra fixa e o feixe de electrões deflectido magneticamente por forma a cobrir uma dada área). Cobriam-se então áreas da ordem dos 50 a 100 $(\mu m)^2$ associadas a contagens por um tempo fixo de 40 segundos e efectuavam-se também varrimentos de áreas equivalentes no padrão de ferro, a fim de determinar o fundo correspondente.

(iii) Coeficiente de repartição do carbono-Ko (C)

Determinou-se de maneira análoga à referida para Ko(Mn), mas com as intensidades CK apenas corrigidas para o fundo.

(iv) % C no «sólido» e no «líquido»

Foi calculada a partir das intensidades CK usadas para o cálculo de Ko(C), assumindo uma relação linear entre a intensidade e a concentração e usando como padrão de carbono o referido em 2.4.

3 — RESULTADOS

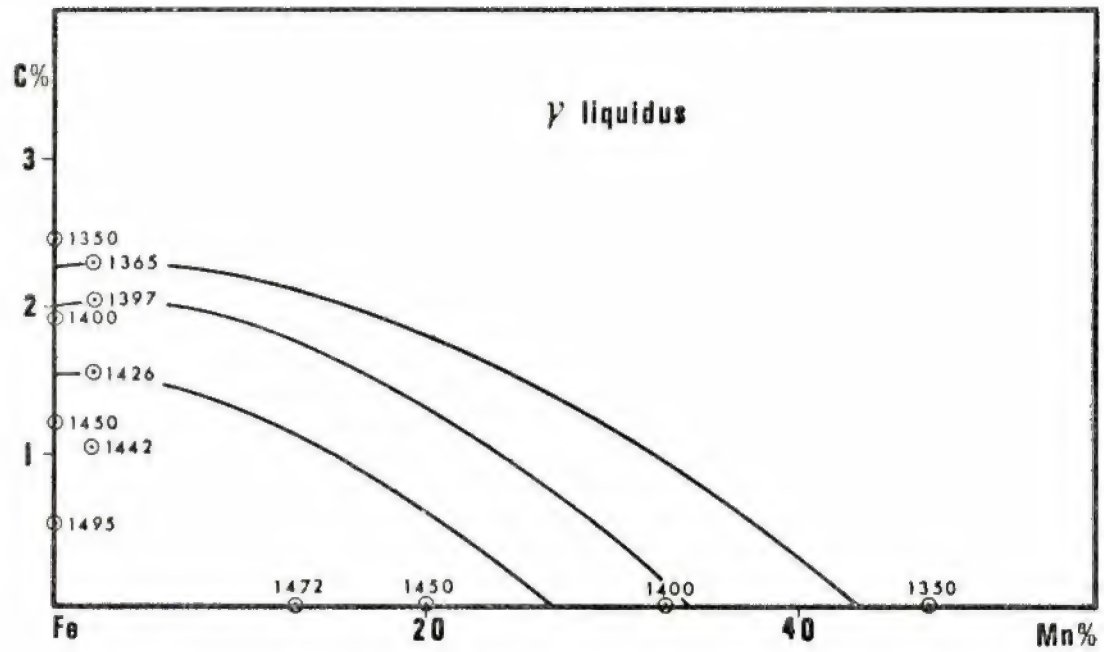
Na tabela II sumarizam-se os ensaios efectuados e respectivos resultados. As composições que aí se referem para as ligas são as composições nominais, podendo a correspondência com as composições reais ser obtida a partir da tabela I.

Note-se a existência de um ensaio com têmpera em água (liga 2, temperatura 1442,5° C) diferente dos outros do mesmo tipo na medida em que corresponde a uma temperatura relativamente próxima do liquidus. A proporção de «líquido» presente na amostra resultante é portanto muito mais elevada do que nas restantes amostras que sofreram o mesmo tipo de têmpera e, consequentemente, as considerações relativas à utilização de varrimentos de área feitas em 2.5.2 não se aplicam a este caso. A realização deste ensaio foi devida ao insucesso de várias tentativas anteriores, de têmpera em bloco de cobre arrecido, para a mesma liga.

Relativamente à liga 1, os dados obtidos não permitiram estabelecer conclusivamente se foi de facto ensaiada na região (líquido + γ). Esta liga não foi portanto considerada nas figuras 8 e 10, embora os valares resultantes da sua microanálise constem da tabela II.

3.1 — Os resultados da microanálise efectuada sobre as amostras estão condensados na tabela II sob a forma de concentrações em Mn e C do «sólido» e do «líquido» em equilíbrio a uma dada temperatura.

3.2 — Os pontos correspondentes às composições «líquido» e «sólido» para as temperaturas ensaiadas estão representados na figura 8, juntamente com valores liquidus e solidus dos diagramas binários Fe-C [12] e Fe-Mn [13].



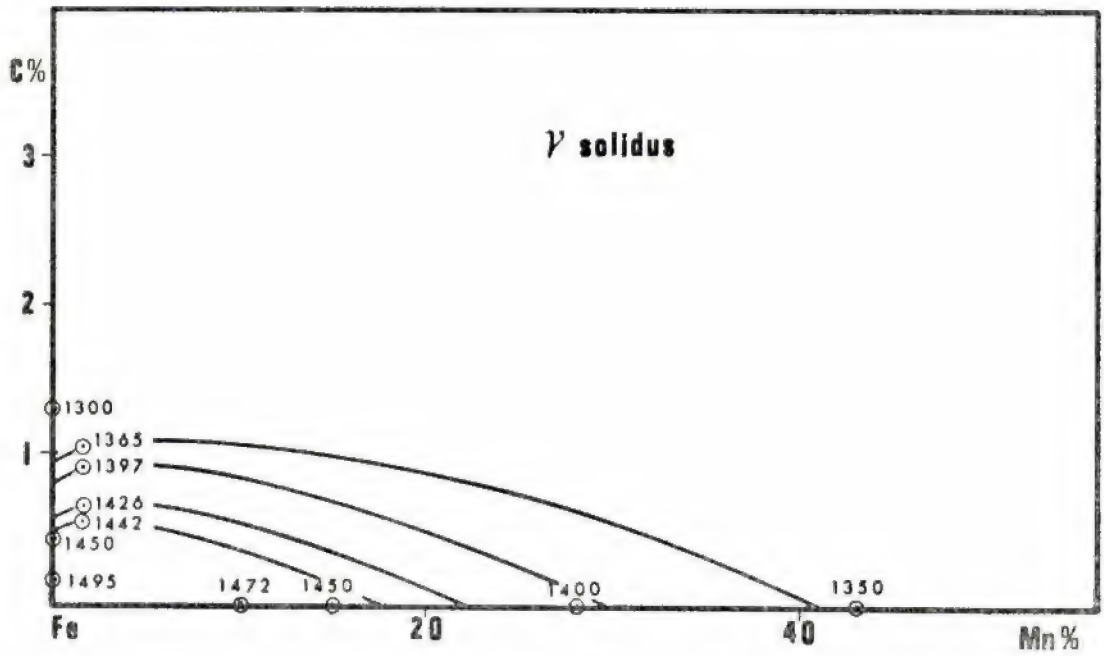


Fig. 8

Aspecto das superfícies γ — liquidus e γ — solidus na região rica em Fe do sistema Fe-Mn-C. Composições em % em peso e temperaturas em °C

Não se representaram nesta figura os valores liquidus resultantes dos ensaios prévios de análise térmica. A montagem experimental utilizada nesses ensaios não era propriamente a mais indicada visto que as cargas eram demasiado pequenas (12 g) e a velocidade de arrefecimento demasiado grande (30° C/ /min.) quando comparadas com as condições normalmente usadas numa análise térmica convencional. Da mesma maneira, não havia facilidades de agitação do banho fundido, nem se tomaram precauções

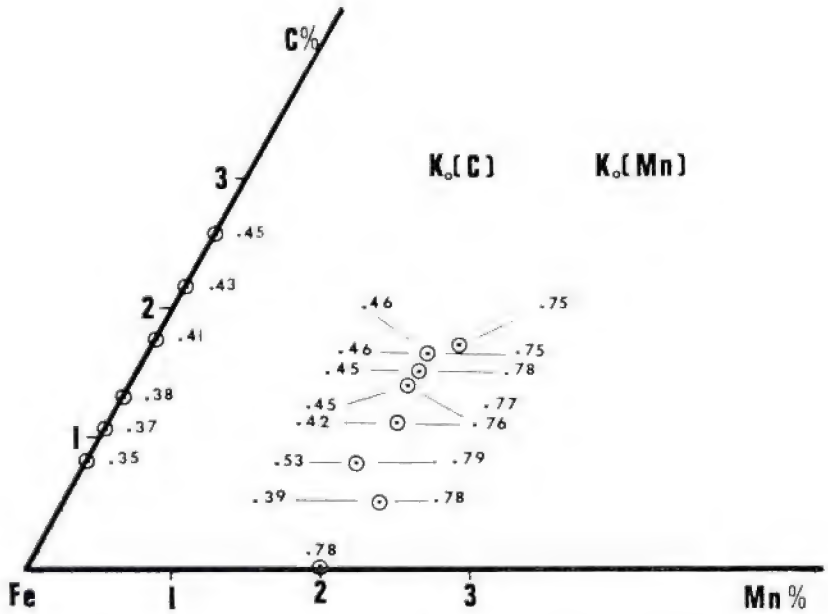


Fig. 9
Ko (Mn) e Ko (C) representados em pontos correspondentes a 50 % de sólido.
Composições em % em peso

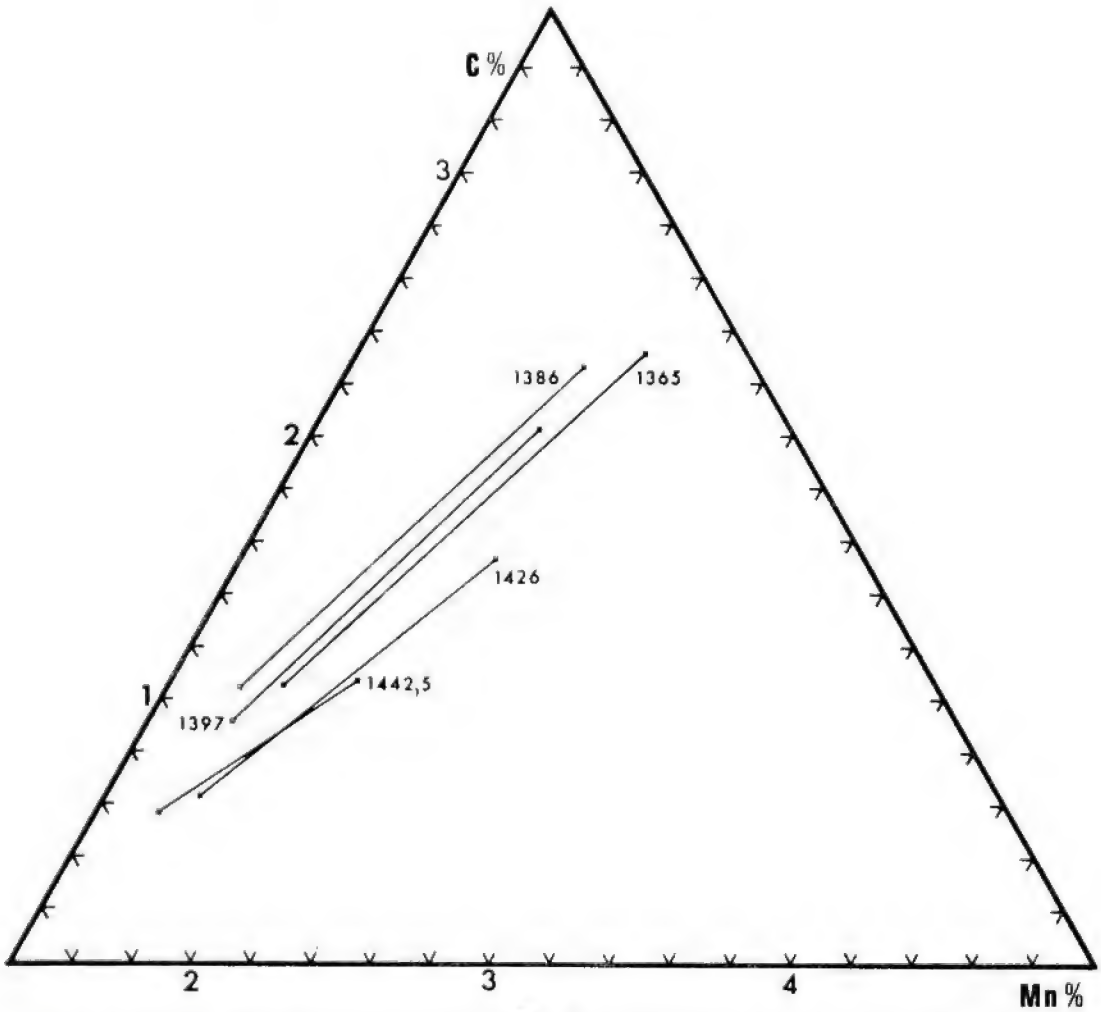


Fig. 10
Linhas de conjugação da região L + γ do sistema Fe-Mn-C. Composições em % em peso e temperaturas em °C

especiais para evitar a volatilização do Mn ou se dispôs de uma análise química do banho tal qual, não havendo portanto dados quanto à composição homogénea exacta à qual a temperatura liquidus determinada correspondia.

3.3 — Os coeficientes de repartição da tabela II encontram-se representados na fig. 9, juntamente com valores de Ko(C) e Ko(Mn) correspondentes aos sistemas binários Fe-C e Fe-Mn. A mesma informação é apresentada, sob outra forma, na fig. 10.

4 — DISCUSSÃO

4.1 — Quando se comparam as características gerais dos registos gráficos obtidos verifica-se que, nas amostras provenientes de têmpera em água (fig. 7) a segregação no «líquido» é muito mais acentuada do que nas provenientes de têmpera em bloco de cobre arrefecido (figs. 5 e 6).

Outra das diferenças manifestada pelas amostras provenientes dos dois diferentes tipos de têmpera reside no gradiente de concentração do soluto no «sólido». Parte deste gradiente pode ser atribuído à função de sonda [14] e ele pode ser também influenciado pelo relevo próprio da amostra, pelas fases localizadas abaixo da superfície e, pelo menos no caso do carbono, pela constante de tempo utilizada. Quando se tomam em consideração estes factores, pode considerar-se que a concentração em Mn no «sólido» não apresenta gradiente real e, consequentemente, as partículas de «sólido» estão em equilíbrio com o «líquido». O gradiente em carbono, quando existe, será então devido à ineficiência da têmpera e tal como previsto é mais acentuado em amostras provenientes de têmpera em água.

Quanto à possível existência de efeitos artificiais de têmpera [5] o registo da fig. 6 não apresenta evidência deles, enquanto os picos mais elevados que delimitam o «sólido» na fig. 7 tanto podem ser atribuídos a esses efeitos como não. O mesmo se poderá dizer dos dois picos mais acentuados que se situam de um dos lados do «sólido» no registo da fig. 5 e, genericamente, de todos os outros registos obtidos. Constata-se portanto que este tipo de efeitos não foi identificado de maneira conclusiva no presente trabalho, o que pode ter resultado não só de têmperas mais eficientes mas também de uma menor sensibilidade na detecção desses efeitos quando se utiliza um varrimento pontual em vez de um varrimento de linha como em [5].

4.2 — Os poucos valores liquidus e solidus obtidos apenas permitem, com o auxílio dos correspondentes valores dos sistemas binários, o estabelecimento da tendência geral das linhas isotérmicas nas superfícies γ-liquidus e γ-solidus, próximo das composições estudadas (fig. 8).

Para o sistema Fe-Mn-C, os únicos valores liquidus publicados correspondem a concentrações relativamente altas de soluto (Mn $>$ 11 %, em peso) [15]. Uma vez que não existe mais informação sobre o assunto, não há possibilidade de se fazerem comparações com os valores agora obtidos, podendo apenas confirmar-se que a tendência geral das isotérmicas da fig. 8 está de acordo com o trabalho de Isobe [15]. Existe contudo um valor (1442,5° C) que não se ajusta a essa tendência, o que sugere que pode ter havido um erro na determinação da composição do «líquido» correspondente a esse ponto.

Em relação à superfície γ-solidus, não há informação publicada com a qual se possa estabelecer comparação.

4.4 — Da comparação entre os coeficientes de repartição correspondentes aos dois primeiros ensaios referidos na tabela II, efectuados aproximadamente à mesma temperatura mas com diferentes tempos, pode concluir-se que o tempo de 2 horas foi já suficiente para se estabelecer o equilíbrio. Pode portanto inferir-se que em todos os outros ensaios este foi também atingido, pelo menos nas partículas «sólidas» com dimensões dentro dos limites considerados.

Em geral não se encontravam numa mesma amostra partículas «sólidas» abarcando uma grande gama de tamanhos mas, nos casos em que se efectuaram varrimentos sobre partículas de dimensões variando entre 75 μm e 250 μm, não se detectou nenhum decréscimo sistemático na concentração em Mn com o acréscimo de dimensão. Uma vez que a difusão do carbono é mais rápida que a do manganês, a constância do teor em Mn no «sólido» pode ser tomada também como prova de que o equilíbrio foi de facto atingido. Isto confirma o que se referiu anteriormente e mostra que as distâncias calculadas em 2.3 foram subestimadas.

Da fig. 9 conclui-se que Ko(Mn) (para uma percentagem fixa de Mn de cerca de 2 % em peso) não varia significativamente com o teor em carbono. Reportando-nos às conclusões de Philibert de que o carbono aumenta o índice de segregação do elemento X em ligas Fe-X-C [16], confirmadas pelo trabalho de Doherty e Melford em ligas Fe-Cr-C [3] a explicação aí sugerida segundo a qual esse efeito era provavelmente devido à diminuição de Ko(X) não parece portanto ser válida no caso de X=Mn.

Quanto a Ko(C) aumenta com a presença do manganês e, se se excluir o valor anómalo de 0,53 (correspondente à temperatura de 1442,5° C anteriormente referida), parece ter tendência a aumentar também ligeiramente com a percentagem de carbono. Contudo este aumento pode resultar de um efeito real de temperatura em Ko, o que não seria de estranhar dado que as superfícies γ-liquidus e γ-solidus não são planas.

CONCLUSÕES

Confirmou-se que a técnica da microanálise é de grande importância na determinação experimental dos coeficientes de repartição entre sólido e líquido. Utilizando essa técnica e dentro de uma gama muito limitada de composições na região (L + γ) do sistema

TABELA II — **Ensaios**

N.º de referência da liga	Composição nominal (% em peso)	Liquidus (ºC)	Temperatura (ºC) e tempo	Região	Têmpera	Manganês (% em peso) «Sólido»	Manganês (% em peso) «Líquido»	Ko(Mn)	Carbono (% em peso) «Sólido»	Carbono (% em peso) «Líquido»	Ko(C)
3	1,6 C — 2 Mn	1401,5	1397 (6h)	L+γ	A	1,68	2,15	0,78	0,92	2,03	0,45
			1396,5 (2h)		A	1,64	2,12	0,77	0,88	1,95	0,45
			1386 (2h)		B	1,64	2,18	0,75	1,04	2,26	0,46
			1385,5 (2h)		A	1,68	2,12	0,79	0,94	2,06	0,46
			1365 (2h)		B	1,79	2,36	0,75	1,06	2,31	0,46
2	1 C — 2 Mn	1449	1442,5 (2h)	L+γ	B	1,61	2,02	0,79	0,57	1,07	0,53
			1426 (2h)		B	1,72	2,25	0,76	0,64	1,53	0,42
1	0,35 C — 2 Mn	1495	1474 (2h)	—	B	1,86	2,40	0,78	0,32	0,83	0,39

Fe-Mn-C, verificou-se que, em relação aos sistemas binários Fe-C e Fe-Mn:

— O coeficiente de repartição do manganês não é afectado significativamente pelo teor em carbono;

— O coeficiente de repartição do carbono aumenta com a presença do manganês.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi efectuado no Departamento de Metalurgia da Universidade de Sheffield, sob a supervisão do Dr. D. H. Kirkwood, e constituiu parte da tese para a obtenção do grau de «Master of Metallurgy» em 1975.

Agradecem-se ao Prof. G. W. Greenwood as facilidades concedidas pelo Departamento e ao Dr. C. W. Haworth e J. W. Horsefield a assistência prestada na operação da microsonda.

O Laboratório de Física e Engenharia Nucleares autorizou a realização do trabalho e concedeu o apoio financeiro necessário.

BIBLIOGRAFIA

[1] **W. Hume-Rothery, J. W. Christian** e **W. P. Pearson**, Metallurgical Equilibrium Diagrams, The Institute of Physics, London, 1952.

[2] **R. A. Buckley**, Techniques of Metals Research, Vol. 4, Part 1, John Wiley & Sons Inc., 1970.

[3] **R. D. Doherty** e **D. A. Melford**, J. I. S. I., 1966, **204**, 1131.

[4] **D. A. Melford** e **D. A. Granger**, I. S. I., Sp. Rep. 110, 1968, 289.

[5] **V. Subramanian, C. W. Haworth** e **D. H. Kirkwood**, J. I. S. I., 1968, **206**, 1027.

[6] **O. Hammar** e **G. Gruenbaum**, Scand. Journal of Metallurgy, 1974, **3**, 11.

[7] **B. Rickinson, Ph. D. Thesis**, Univ. of Sheffield, 1975.

[8] **R. A. Buckley** e **W. Hume-Rothery**, J. I. S. I., 1964, **202**, 895.

[9] **C. Wells** e **R. F. Mehl**, Trans. AIME, 1941, **145**, 329.

[10] **B. Chalmers**, Principles of solidification, John Wiley & Sons Inc., New York, 1964.

[11] **C. W. Haworth**, comunicação particular.

[12] **J. Chipman**, Met. Trans., 1972, **3**, 55.

[13] **W. Hume-Rothery** e **A. Hellawell**, Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1957, **249**, 417.

[14] **D. R. Beaman** e **J. A. Isasi**, ASTM Sp. Tech. Pub. 506, 1972.

[15] **M. Isobe**, Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., 1951, **3**, Ser. A, 540.

[16] **J. Philibert, E. Weinryb** e **M. Ancey**, Metallurgia, 1965, **72**, 203.

NÚMERO 445/446 DEZEMBRO 1977/JANEIRO 1978 ANO LII/LIII VOLUME XXXIX

C. D. U. 621.3.016.33:518.5

Solução do trânsito de potência pelo método do desacoplamento

J. M. FERREIRA DE JESUS (1)
J. P. SUCENA PAIVA (1)

RESUMO

O cálculo do trânsito (ou fluxo) de potência numa rede de energia eléctrica, é presentemente efectuado em computador digital por meio de diversos métodos numéricos, dentre os quais o mais sofisticado é o método de Newton-Raphson e suas variantes.

No artigo os autores descrevem um programa de cálculo baseado numa destas variantes, o método do desacoplamento, inicialmente proposto por Stott [10].

É dada especial ênfase às técnicas de programação com esparsidade utilizadas. Apresentam-se os resultados numéricos obtidos para diversas redes, comparando-as com os obtidos pelo método de Newton-Raphson clássico.

SUMMARY

The power flow solution in an electric energy system is currently executed by digital computer using several numerical methods, of which the most powerful is the Newton-Raphson and its variations.

In this paper the authors describe a computer programme based upon one of these variations, the decoupling method, initially suggested by Stott [10].

The sparsity programming thecniques are specially emphazised. Numerical results for several real systems are presented, and compared with those obtained by the classic Newton — Raphson method.

1 — INTRODUÇÃO

O cálculo de uma rede de energia eléctrica em regime estacionário, geralmente designado por trânsito (ou fluxo) de potência, é presentemente efectuado em computador digital. Antes do advento deste, e ainda durante algum tempo depois, a solução do trânsito de potência era obtida por meio do analisador de redes.

As primeiras soluções por computador digital apareceram na literatura em 1956 [1] e 1957 [2] e empregavam o método dos deslocamentos sucessivos, geralmente conhecido por Gauss-Seidel. Este método iterativo, que utilizava a representação da rede pela matriz das admitâncias nodais, em breve se tornou inadequado devido à sua reduzida velocidade de convergência.

O método de Newton-Raphson, inicialmente proposto por Van Ness [3], apresenta características de convergência largamente superiores. No início da sua aplicação à solução do trânsito de potência revelou-se pouco competitivo devido às suas exigências no que concerne à memória ocupada. Com o aperfeiçoamento por Tinney e outros [4] — [7] dos métodos de programação com esparsidade, o tempo de cálculo do método

(1) Engenheiro Electrotécnico (I. S. T.).
Assistente do I. S. T.
Investigador do C. E. U. L.
(2) Engenheiro Electrónico (I. S. T.), Ph. D., D. I. C., M. I. E. E. E.
Professor Auxiliar do I. S. T.
Investigador do C. E. U. L.
Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

de Newton-Raphson foi substancialmente reduzido e as necessidades de memória diminuidas, tornando este método o mais sofisticado que o engenheiro de sistemas tem presentemente à sua disposição para a solução do fluxo de potência.

Devido ao aumento contínuo da dimensão das redes de energia a calcular e ao uso cada vez mais generalizado dos programas de trânsito de potência, a investigação prosseguiu com a vista a tornar o método de Newton-Raphson ainda mais eficiente. Uma característica essencial de qualquer rede de energia é a forte interdependência entre o trânsito de potências activas e os argumentos das tensões, por um lado, e entre o trânsito de potências reactivas e os módulos da tensão, por outro. Em contrapartida o acoplamento entre potência activa e módulo da tensão, e potência reactiva e argumento da tensão é relativamente pouco importante. Recentemente Stott [9] [10] tirando partido destas propriedades propôs o método do desacoplamento no qual os trânsitos de potência activa e reactiva são resolvidos separadamente.

Em relação ao método clássico de Newton-Raphson, o método do desacoplamento, que se pode considerar uma variante daquele, necessita de um número em geral mais elevado de iterações até atingir a convergência. Contudo o tempo de cálculo por iteração é substancialmente (cerca de 5 vezes) menor, o que resulta numa apreciável redução do tempo de cálculo. As exigências de memória são também consideravelmente (cerca de 40 %) inferiores às do método de Newton-Raphson.

Nesta comunicação descreve-se um programa de cálculo executado no Centro de Electrotecnia das Universidades de Lisboa, que utiliza o método do desacoplamento proposto por Stott, com algumas variantes.

Dado que é difícil encontrarem-se na literatura detalhes das técnicas de programação com esparsidade, que são a chave do êxito dos métodos de cálculo expostos, pareceu aos autores que teria interesse desenvolver com algum pormenor este aspecto.

A utilidade dos métodos de programação com esparsidade não se restringe aliás à solução do trânsito de potência, encontrando aplicação nos mais diversos ramos da engenharia.

O programa foi aplicado ao cálculo diversas redes, tendo-se sempre obtido a convergência com rapidez e segurança. No corpo do artigo dá-se conta dos resultados obtidos, que são comparados com os do método de Newton-Raphson clássico.

2 — MÉTODO DO DESACOPLAMENTO

As equações do fluxo de potência numa rede de energia em regime estacionário são [15]

$$P_i - j\,Q_i - \sum_{j=1}^{n} y_{ij}\,V_i^*\,V_j = 0 \qquad (1)$$

$$i = 1, 2, \ldots, n$$

Representando as tensões sob forma polar, as n equações complexas [1] transformam-se em 2n equações reais

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^{n} U_j \left[G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] = 0 \qquad (2.a)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^{n} U_j \left[G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \right] = 0 \qquad (2.b)$$

$$i = 1, 2, \ldots, n$$

A cada barramento da rede corresponde um par de equações [2]. Há porém que considerar que numa rede de energia se definem três tipos de barramentos

— Barramentos tipo PQ, para os quais são conhecidas as potências injectadas P_i e Q_i e desconhecidos o módulo e argumento da tensão U_i e δ_i.

— Barramentos tipo PU, para os quais são conhecidos a potência activa injectada P_i e o módulo da tensão U_i e desconhecidos argumento da tensão δ_i e a potência reactiva Q_i. Estes nós podem ser transformados em nós tipo PQ se durante o cálculo se verificar que Q_i excede os limites do gerador ligado ao nó i, Q_{min} e Q_{max}.

— Barramentos de balanço ou flutuantes, para os quais são conhecidos o módulo e argumento da tensão e desconhecidas as potências activa e reactiva. Em geral numa rede existe apenas um nó deste tipo, podendo no entanto, haver mais do que um.

A aplicação do método de Newton-Raphson à solução das eqs. [2] conduz a [15]

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} \tag{3}$$

Os erros de fecho ΔP_i e ΔQ_i são respectivamente os valores dos primeiros membros das equações (2a) e (2b).

Os elementos do Jacobiano são dadas pelas expressões seguintes [15]:

Para $i \neq j$

$$H_{ij} = L_{ij} = U_i\ U_j\ [\ G_{ij} \sin\ (\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos\ (\delta_i - \delta_j)\ ] \tag{4a}$$

$$N_{ij} = J_{ij} = U_i\ U_j\ [\ G_{ij} \cos\ (\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin\ (\delta_i - \delta_j)\ ] \tag{4b}$$

Para $i = j$

$$H_{ii} = -\ Q_i - B_{ii}\ U_i^2 \tag{5a}$$

$$L_{ii} = \ Q_i - B_{ii}\ U_i^2 \tag{5b}$$

$$N_{ii} = \ P_i + G_{ii}\ U_i^2 \tag{5c}$$

$$J_{ii} = \ P_i - G_{ii}\ U_i^2 \tag{5d}$$

Se estas equações forem satisfeitas com determinado conjunto de valores dos argumentos δ_i e módulos U_i das tensões nodais, então $\Delta P_i = \Delta Q_i = 0$ e o problema está resolvido. Caso contrário a equação matricial [3] permite calcular correcções $\Delta\delta_i$ e ΔU_i a adicionar aos valores de δ_i e U_i. Desta operação resultam melhores aproximações dos valores correctos. O processo iterativo dá-se por terminado quando ΔP e ΔQ forem inferiores a uma dada tolerância especificada (por exemplo 0,01 MW/MVAR).

Os erros de fecho para os barramentos de balanço não são incluídos na equação [3] nem ΔQ_i e ΔU_i para os nós do tipo PU. A ordem do sistema de equações o resolver é por conseguinte $(n_{PU} + 2\ n_{PQ})$. Se os nós i e j não estão directamente ligados então o elemento y_{ij} da matriz das admitâncias nodais é nulo,, o mesmo sucedendo aos elementos correspondentes das submatrizes [H], [N], [J] e [L]. O Jacobiano é por conseguinte uma matriz muito esparsa com simetria topológica mas não numérica.

O método de Newton-Raphson, na versão polar apresentada converge quase sempre em 2 a 5 iterações, independentemente do número de barramentos da rede, a partir de uma partida $V_i = 1{,}0\ \angle\ 0°$ p. u.. Se houver mudança de tipo de nós (PU para PQ ou vice-versa), devido à necessidade de satisfazer limites rígidos de potência reactiva ou de tensão, ou se proceder à actuação automática da relação de transformação dos transformadores para regular a tensão em determinados barramentos o número de iterações aumenta consideravelmente. De salientar que o Jacobiano tem de ser calculado e triangularizado em cada iteração, o que representa uma percentagem substancial do tempo total de cálculo por iteração.

O método de desacoplamento é uma variante do método de Newton-Raphson no qual se desprezam as submatrizes [N] e [J] do Jacobiano, que são a representação matemática do fraco acoplamento [ΔP] e [ΔU/U], e [ΔQ] e [Δδ], respectivamente. Obtêm-se assim equações separadas para os fluxos de potência activa e reactiva

$$[\Delta P] = [H]\ \ [\ \Delta\delta\ ] \tag{6}$$

$$[\Delta Q] = [L]\ \ [\Delta U/U] \tag{7}$$

Esta simplificação, embora permita uma redução substancial da memória exigida ao computador, resulta uma degradação das características de convergência do método de Newton-Raphson, pelo que o número de iterações até se atingir a convergência aumenta. A redução total do tempo de cálculo é pouco significativa.

O método só se torna verdadeiramente eficiente se a submatrizes [H] e [L] forem constantes, o que constitui a característica mais saliente do método proposto por Stott [10]. No Anexo 7.2 apresenta-se a formulação deste método, que leva até às últimas consequências o princípio do desacoplamento. As equações [6] e [7] transformam-se em

$$[\Delta P/U] = [B'] \quad [\Delta\delta] \tag{8}$$

$$[\Delta Q/U] = [B''] \quad [\Delta U] \tag{9}$$

onde

$$b'_{ij} = -\frac{1}{X_{ij}} \qquad (i \neq j) \tag{10}$$

$$b'_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} \frac{1}{X_{ij}} \tag{11}$$

$$b''_{ij} = -B_{ij} \tag{12}$$

As matrizes [B'] e [B''] representam aproximações constantes aos declives dos hiperplanos tangentes às funções $\Delta P/U$ e $\Delta Q/U$, respectivamente. São matrizes reais, esparsas e simétricas, com elementos constantes.

Para a solução das equações (8) e (9), após uma comparação dos possíveis métodos, foi decidido utilizar a bi-factorização, inicialmente proposta por Zollenkopf [17]. A fim de minimizar a criação de novos elementos não nulos que a factorização acarreta, procede-se previamente a uma ordenação dinâmica das colunas de [B'] e [B''].

Dado que [B'] e [B''] tem elementos constantes a bi-factorização é efectuada apenas uma vez antes do início do processo iterativo.

As equações (8) e (9) podem ser resolvidas simultaneamente em cada iteração, sendo contudo muito mais eficiente resolver primeiro a equação (8) para obter $[\Delta\delta]$ e corrigir os valores de $[\delta]$ antes de calcular $[\Delta Q/U]$ e resolver a equação (9) para obter $[\Delta U]$. Este método conduz a valores muito aproximados da solução apenas após uma ou duas iterações. As iterações subsquentes permitem refinar estes valores, sendo no entanto perdida a convergência quadrática do método de Newton-Raphson.

Em comparação com o método de Newton-Raphson, cada iteração do método do desacoplamento é muito mais rápida embora o número total de iterações até se atingir a convergência seja, para a mesma tolerância dos erros de fecho, em geral mais elevado. O tempo total de cálculo vem consideravelmente reduzido, bem como a memória ocupada.

3 — DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO

O programa desenvolvido é composto por sete subrotinas de cálculo e três subrotinas entrada-saída. Descrevem-se em seguida as subrotinas de cálculo, dando especial atenção às técnicas de programação com esparsidade utilizadas.

3.1 — Armazenamento da matriz de admitâncias nodais

Sendo a matriz de admitâncias esparsa e simétrica, são apenas armazenados os termos não nulos correspondentes ao triângulo superior. Os elementos diagonais da matriz de admitâncias são armazenados num vector DIAG.

Os elementos não diagonais do triângulo superior são armazenados num vector VALOR. Para detectar a posição destes elementos são criados dois vectores LINHA e ICOL.

Tem-se assim duas tabelas: na primeira armazenam-se os elementos diagonais da matriz de admitâncias. O índice do vector DIAG é o número do nó de que se pretende o elemento diagonal; na segunda tabela o índice de VALOR, LINHA e ICOL é um índice mudo. Em LINHA é armazenado o índice da linha a que o elemento VALOR pertence, sendo armazenado em ICOL o índice da coluna correspondente.

Exemplificando, suponha-se que se pretende armazenar a matriz:

$$[A] = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -2 & 0 \\ -1 & 3 & 0 & -4 \\ -2 & 0 & 5 & -5 \\ 0 & -4 & -5 & 6 \end{bmatrix}$$

As tabelas ficarão preenchidas como a seguir se indica:

TABELA 1

I	1	2	3	4
DIAG (I)	2	3	5	6

TABELA 2

K	1	2	3	4
VALOR (K)	−1	−2	−4	−5
LNHA (K)	1	1	2	3
ICOL (K)	2	3	4	4

Os elementos da matriz das admitâncias têm interesse para a determinação de [ΔP/U] e [ΔQ/U], que ocupa uma parcela importante do tempo de cálculo por iteração. A tabela 2 é percorrida sequencialmente, desde K=1 até ao valor máximo, sendo detectados os elementos G_{ij} e B_{ij} e calculados os termos $U_i\ U_j\ G_{ij}$ e $U_i\ U_j\ B_{ij}$. Estes termos podem ser usados directamente para o cálculo ΔP_i, ΔP_j, ΔQ_i e ΔQ_j (equações (2a) e (2b) por soma com os valores acumulados.

As funções trignométricas sin $(\delta_i - \delta_j) = -$ sin $(\delta_j - \delta_i)$ e cos $(\delta_i - \delta_j) =$ cos $(\delta_j - \delta_i)$ podem, para para tornar o cálculo mais rápido, ser aproximados para dois e três termos da expansão em série, respectivamente, sem perda significativa de precisão.

3.2 — Armazenamento das matrizes [B'] e [B"]

As matrizes [B'] e [B"] são simétricas e têm esparsidade idêntica à matriz de admitâncias. Dado que a factorização acarreta em geral a criação de novos elementos, [B'] e [B"] devem ser armazenados de forma a permitir o processamento dos novos elementos com eficiência.

O método de armazenamento de [B'] e [B"] baseia-se nas duas tabelas a seguir indicadas:

TABELA 1

DIAG1 — valor numérico do elemento diagonal de [B']
DIAG2 — valor numérico do elemento diagonal de [B"]
ILOC — localização do primeiro elemento não diagonal da coluna correspondente na tabela 2
NANU — número de elementos não nulos não diagonais na coluna correspondente

TABELA 2

VALOR1 — Valor numérico do elemento não diagonal de [B']
VALOR2 — Valor numérico do elemento não diagonal de [B"]
I LINHA — Índice da linha do elemento não diagonal de [B'] e [B"]
I PROX — Localização do próximo elemento não nulo na coluna; se não existir próximo elemento é colocado um zero na posição correspondente ao último elemento da coluna.

A matriz [A] usada previamente será, de acordo com este esquema armazenado do modo seguinte:

TABELA 1

I	1	2	3	4
DIAG (I)	2	3	5	6
ILOC (I)	1	3	5	7
NANU (I)	2	2	2	2

TABELA 2

K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
VALOR (K)	−1	−2	−1	−4	−2	−5	−4	−5	0	0	
ILINHA (K)	2	3	1	4	1	4	2	3	0	0	
IPROX (K)	2	0	4	0	6	0	8	0	10	11	

Para poupar memória, os vectores auxiliares ILOC, NANU, ILINHA e IPROX são comuns às duas matrizes [B'] e [B''], o que levanta algumas dificuldades no tratamento dos nós tipo PU. Com efeito na matriz [B''] não existem as linhas e colunas correspondentes aos nós deste tipo. Na ordenação e factorização os elementos destas linhas e colunas não são por conseguinte processados. Contudo se houver infracção dos limites de potência reactiva, o nó sofre um tratamento especial (ver secção 3.6), para o qual é necessário conhecer os valores destes elementos.

Nestas condições é necessário criar mais dois vectores LOC e NPROX pertencentes respectivamente às tabelas 1 e 2. LOC indica a posição do primeiro elemento não diagonal da coluna correspondente ao nó PU na tabela 2; NPROX indica a posição do próximo elemento não diagonal da mesma coluna.

A primeira vista a memória necessária para o armazenamento de [B'] e [B''] poderá parecer excessiva, nomeadamente o armazenamento de todos os elementos e não apenas os triângulos superiores, como no caso da matriz de admitâncias. Tal é contudo aparente, visto a informação contida nas duas tabelas criadas ser toda necessária a reconstrução de [B'] e [B''] e para a realização da factorização em qualquer sequência de eliminação. Além disso durante a factorização são geralmente criados novos elementos não nulos, que são armazenados nas posições livres criadas durante a ordenação. Estas correspondem aos elementos do triângulo superior que no decorrer do processo forem eliminados.

3.3 — Bifactorização

No programa que ora se descreve utilizou-se a bifactorização das matrizes [B'] e [B''] na solução das equações (8) e (9).

O método, desenvolvido por Zollenkopf [17], consiste na determinação de 2n matrizes factores (para uma matriz n × n) de tal modo que o produto destas 2n matrizes satisfaça a relação:

$$[L^{(n)}]\,[L^{(n-1)}]\cdots[L^{(2)}]\,[L^{(1)}]\,[A]\,[R^{(1)}]\,[R^{(2)}]\cdots[R^{(n-1)}]\,[R^{(n)}] = [I] \tag{13}$$

onde [A] — matriz original

[L] — matrizes factores esquerdas

[R] — matrizes factores direitas

[I] — matriz identidade

Pré-multiplicando sequencialmente a equação (13) pelos inversos de $[L^{(n)}]$, $[L^{(n-1)}]$, ... $[L^{(2)}]$ e $[L^{(1)}]$, vem:

$$[A]\,[R^{(1)}]\,[R^{(2)}]\cdots[R^{(n-1)}]\,[R^{(n)}] = [L^{(1)}]^{-1}\,[L^{(2)}]^{-1}\cdots[L^{(n-1)}]^{-1}\,[L^{(n)}]^{-1} \tag{14}$$

Pós-multiplicando sequencialmente (14) por $[L^{(n)}] \cdot [L^{(n-1)}] \cdots [L^{(2)}] [L^{(1)}]$ vem:

$$[A] [R^{(1)}] [R^{(2)}] \cdots [R^{(n-1)}] [R^{(n)}] [L^{(n)}] [L^{(n-1)}] \cdots [L^{(2)}] [L^{(1)}] = [I] \tag{15}$$

Finalmente pré-multiplicando (15) por $[A]^{-1}$ vem:

$$[R^{(1)}] [R^{(2)}] \cdots [R^{(n-1)}] [R^{(n)}] [L^{(n)}] [L^{(n-1)}] \cdots [L^{(2)}] [L^{(1)}] = [A]^{-1} \tag{16}$$

As matrizes factores permitem asim determinar a inversa de [A] a partir da expressão (16).

A solução do sistema de equações

$$[A] [X] = [B] \tag{17}$$

é por conseguinte dada por

$$[X] = [R^{(1)}] [R^{(2)}] \cdots [R^{(n-1)}] [R^{(n)}] [L^{(n)}] [L^{(n-1)}] \cdots [L^{(2)}] [L^{(1)}] [B] \tag{18}$$

A dedução das expressões das matrizes factores não se apresenta por falta de espaço. Verifica-se [17] que

$$[L^{(K)}] = \begin{bmatrix} 1 & & l_{1j} & & & \\ & \ddots & \vdots & & & \\ & & l_{jj} & & & \\ & & l_{1j} & 1 & & \\ & & \vdots & & \ddots & \\ & & l_{nj} & & & 1 \end{bmatrix} \tag{19}$$

onde

$$l_{ij} = \frac{a_{ij}^{(k-1)}}{a_{ij}^{(K-1)}} \qquad i \neq j$$

$$l_{ij} = \frac{1}{a_{jj}^{(K-1)}} \tag{20}$$

e

$$[R^{(K)}] = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & \ddots & & & & & \\ r_{j1} & \cdots & 1 & r_{ji} & \cdots & r_{jn} \\ & & & 1 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \tag{21}$$

onde

$$r_{ji} = -\frac{a_{ji}^{(K-1)}}{a_{jj}^{(K-1)}} \qquad i \neq j \tag{22}$$

Os elementos $a_{ij}^{(K)}$ que figuram nas equações (20) e (22) podem ser obtidos pela fórmula de recorrência

$$a_{il}^{(K)} = a_{il}^{(K-1)} - \frac{a_{ij}^{(K-1)} \; a_{jl}^{(K-1)}}{a_{jj}^{(K-1)}} \qquad \begin{matrix} i \neq j \\ l \neq j \end{matrix} \tag{23}$$

$a_{il}^{(0)}$ são os elementos originais da matriz [A]. Se esta for simétrica, tem-se $a_{il}^{(K-1)} = a_{li}^{(K-1)}$, sendo por consequência $r_{il}^{(K)} = l_{li}^{(K)}$. Pode concluir-se portanto que, àparte o elemento diagonal, [R] é a transposta de [L].

Da equação (21) pode verificar-se que a matriz $\left[R^{(n)}\right]$ é a matriz identidade. A equação (18) simplifica-se portanto

$$[X] = \left[R^{(1)}\right] \left[R^{(2)}\right] \cdots \left[R^{(n-1)}\right] \left[L^{(n)}\right] \left[L^{(n-1)}\right] \cdots \left[L^{(2)}\right] \left[L^{(1)}\right] [B] \tag{24}$$

A solução de um sistema de equações lineares por meio da bifactorização é basicamente equivalente a uma eliminação de Gauss-Jordan. Nas matrizes factores [L] e [R] está contida toda a informação relativa às operações necessárias para efectuar esta eliminação. Do ponto de vista de cálculo a bifactorização é porém muito mais eficiente pois as matrizes [L] e [R] são calculadas uma só vez antes do início do processo iterativo e armazenadas apenas os elementos não nulos (com a excepção dos elementos diagonais unitários). Soluções repetitivas do sistema de equações (17) com vectores de termos independentes [B] diferentes são levados a cabo com extrema rapidez por utilização da equação (24). O número de posições de memória necessárias para armazenar as matrizes factores [L] (é inútil armazenar as matrizes [R], visto serem as transpostas de [L], é em geral inferior ao número de posições necessárias para armazenar a matriz [A] completa, podendo no entanto ser ligeiramente superior. Esta propriedade pressupõe a utilização de uma ordenação eficiente das colunas da matriz [A].

O algoritmo de cálculo digital decorre com a lógica seguinte. A partir do vector ILIM determina-se qual o primeiro nó a ser eliminado, isto é, quais as primeiras matrizes factores $\left[L'^{(1)}\right]$ e $\left[L''^{(1)}\right]$ a ser calculadas. Os elementos respectivos são obtidos pela equação (20) e armazenados nas posições previamente ocupadas pelos elementos da coluna correspondente àquele nó.

Seguidamente são efectuadas todas as alterações nos elementos [B'] e [B''] devidos à eliminação do primeiro nó, de acordo com a equação (23). Os eventuais elementos novos são armazenados nas posições livres criadas durante a ordenação. O vector ILIM indica agora qual o segundo nó a ser eliminado, calculando-se $\left[L'^{(2)}\right]$ e $\left[L''^{(2)}\right]$ e repetindo-se a sequência até ao processamento do último nó.

Esta lógica sofre apenas alteração devido à presença de nós tipo PU. Assim durante a bifactorização de [B''], quer os elementos das colunas correspondentes a nós tipo PU, quer os elementos das colunas tipo PQ com elementos numa linha tipo PU não são processados.

A matriz [A], usada exemplo na secção 3.2, transforma-se, após a bifactorização em

$$\begin{bmatrix} 0{,}5 & 0{,}5 & 1 & 0 \\ 0{,}5 & 0{,}4 & 0{,}4 & 1{,}6 \\ 1 & 0{,}4 & 0{,}384 & 2{,}54 \\ 0 & 1{,}6 & 2{,}54 & -0{,}058 \end{bmatrix}$$

São apenas armazenados os elementos não nulos (excluindo os elementos unitários do diagonal) das matrizes factores [L], situadas abaixo da linha a traço interrompido. As tabelas 1 e 2 da secção 3.2 transformam-se em:

TABELA 1

I	1	2	3	4
DIAG(I)	0,5	0,4	0,384	−0,058
ILOC(I)	2	2	1	0
NANU(I)	1	3	6	0
ILIM(I)	1	2	3	4

TABELA 2

I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VALOR (K)	0,5	1	0,4	1,6	0	2,538	0	0	0	0
ILINHA (K)	2	3	3	4	2	2	3	0	0	0
IPROX (K)	2	0	4	0	9	0	5	7	10	0

3.4 — Ordenação

No programa elaborado utilizou-se um método de ordenação dinâmica da sequência de eliminação, com vista a minimizar a criação de novos elementos não nulos.

O método consiste basicamente em escolher para pivot, em cada passo da eliminação de linhas e colunas de [B'] e [B''], usando o método de Gauss-Jordan, o elemento diagonal da coluna que tenha o menor número de elementos não nulos. Se mais de uma coluna estiver nestas condições, escolhe-se a coluna com número mais baixo. A eliminação de uma linha e uma coluna de idêntica ordem numa matriz (simétrica) é equivalente à eliminação do nó correspondente no grafo associado, pelo que se usarão indistintivamente as duas designações. Em relação à matriz [A] usada como exemplo, verifica-se por inspecção das tabelas da secção 3.2 que o primeiro elemento pivot é o elemento diagonal da coluna 1, visto que o vector NANU tem para todos os elementos o valor 2.

A escolha do próximo elemento pivot depende do número de elementos não nulos em cada coluna da matriz a factorizar, após a eliminação da primeira linha e coluna. Devido à criação de novos elementos não nulos que esta operação em geral acarreta, há que simular a eliminação, sem contudo se calcular os valores dos novos elementos. Nesta fase, o que importa saber é se estes elementos existem ou não.

Para determinar quais as colunas que vão ser reduzidas com a coluna a que pertence o elemento pivot examinam-se na tabela 2 os elementos não diagonais desta coluna. O índice da linha do primeiro elemento não nulo (dado pelo vector LINHA) indica qual a primeira coluna a ser reduzida (*). Considerando a matriz [A] como exemplo, esta seria a coluna 2.

Para simular o processo de redução, comparam-se os índices das linhas dos elementos não diagonais da coluna a reduzir com a coluna redutora (pivot). Se numa dada linha o elemento da coluna redutora for não nulo e o elemento da coluna reduzida for nulo, há criação de um elemento novo.

Após a simulação da redução da primeira coluna, procura-se o próximo elemento não diagonal da coluna redutora. O índice da linha deste elemento indica qual a próxima coluna a reduzir. O processo repete-se até que se esgotarem os elementos não nulos da coluna redutora. Em seguida determina-se por inspecção do vector NANU qual o próximo elemento diagonal que vai servir de pivot. Note-se que NANU é alterado durante o processo de simulação da ordenação devido à anulação dos elementos da linha a que pertence o pivot e à criação de novos elementos.

No processo de eliminação de Gauss-Jordan, a linha e coluna a que pertence o elemento pivot são eliminadas e o elemento correspondente do vector independente modificado de acordo com as operações

(*) Está-se apenas a considerar o caso de matrizes simétricas.

efectuadas. Na bifactorização o vector independente não é alterado, sendo as operações envolvidas na eliminação memorizados nas matrizes factores [R] e [L]. Os elementos destas matrizes vão ser armazenados nas posições previamente ocupadas pelas linhas e colunas eliminadas. Note-se que, se a matriz a factorizar for simétrica, apenas são armazenados os elementos das matrizes [L]. Durante a simulação da ordenação são anulados os elementos da linha a que corresponde o elemento pivot, de forma a criar posições livres na tabela 2 para armazenar os novos elementos não nulos.

A presença dos nós tipo PU obriga a alterações na lógica que acaba de ser exposta. Como já foi referido na secção 3.2, os elementos das linhas e colunas correspondentes a estes nós não são alterados na simulação da matriz [B''], sendo a sua posição nas tabelas dada pelos vectores LOC e NPROX.

Para o cálculo dos elementos das matrizes factores [L] durante a factorização, os nós devem ser processados pela ordem determinada no processo de ordenação. É portanto necessário criar um novo vector, ILIM, na tabela 1, onde fica armazenada a ordem de eliminação determinada durante a ordenação. O índice de ILIM indica a ordem de eliminação e o seu valor indica o número do nó a ser eliminado: assim, se ILIM(n) = k, o nó k será o n-ésimo nó a ser eliminado.

3.5 — Cálculo dos acréscimos [Δδ] e [ΔU]

As soluções [Δδ] e [ΔU] das equações (8) e (9) obtêm-se, de acordo com a equação (24), pela multiplicação sequencial das matrizes factores de [B'] e [B''] pelos vectores [ΔP/U] e [ΔQ/U], respectivamente

$$[\Delta\delta] = [R'^{(2)}]\,[R'^{(2)}] \cdots [R'^{(n-1)}]\,[L'^{(n)}] \cdots [L'^{(2)}]\,[L'^{(1)}]\,[\Delta P/U] \tag{25}$$

$$[\Delta u] = [R''^{(1)}]\,[R''^{(2)}] \cdots [R''^{(n-1)}]\,[L''^{(n)}] \cdots [L''^{(2)}]\,[L''^{(1)}]\,[\Delta Q/U] \tag{26}$$

Usando as técnicas de programação com esparsidade mencionados na secção 3.2, esta multiplicação é levada a cabo com extrema rapidez. Considere-se a multiplicação de um vector $[B^{(0)}]$ pela matriz $[L^{(K)}]$. Tem-se

$$\begin{bmatrix} 1 & & & -\dfrac{a_{ij}^{(K-1)}}{a_{jj}^{(K-1)}} & & & \\ & \ddots & & \vdots & & & \\ & & \ddots & -\dfrac{1}{a_{jj}^{(K-1)}} & & & \\ & & & -\dfrac{a_{ij}^{(K-1)}}{a_{jj}^{(K-1)}} & 1 & & \\ & & & \vdots & & \ddots & \\ & & & -\dfrac{a_{nj}^{(K-1)}}{a_{jj}^{(K-1)}} & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1^{(0)} \\ \vdots \\ b_j^{(0)} \\ \\ b_i^{(0)} \\ \vdots \\ b_n^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1^{(1)} \\ \vdots \\ b_j^{(1)} \\ \\ b_i^{(1)} \\ \vdots \\ b_n^{(1)} \end{bmatrix} \tag{27}$$

onde

$$b_i^{(1)} = b_i^{(0)} - \frac{a_{ij}^{(K-1)}}{a_{jj}}\, b_j^{(0)} \qquad i \neq j$$

$$b_j^{(1)} = \frac{b_j^{(o)}}{a_{jj}^{(K-1)}} \tag{28}$$

Do ponto de vista de cálculo a operação representada pela equação (27) decorre do seguinte modo. De acordo com ILIM (ver secção 3.4) determina-se qual o primeiro nó para o qual se vão calcular $[\Delta\delta]$ e $[\Delta u]$. A partir do conhecimento deste nó procuram-se os elementos das primeiras matrizes factores $\left[L'^{(1)}\right]$ e $\left[L''^{(1)}\right]$ alteram-se os valores de $[\Delta P/U]$ e $[\Delta Q/U]$ de acordo com a eq. (28). Em seguida determina-se através de ILIM qual o próximo nó a ser tratado e procuram-se os elementos de $\left[L'^{(2)}\right]$ e $\left[L''^{(2)}\right]$, alterando-se novamente os valores de $[\Delta P/U]$ e $[\Delta Q/U]$. O processo repete-se até ao último nó da rede. Salienta-se que as colunas das matrizes [L] são esparsas pelo que apenas alguns elementos dos vectores $[\Delta P/U]$ são alterados em cada multiplicação pelas matrizes [L'] e [L''] respectivamente.

O produto de um vector $\left[B^{(0)}\right]$ por uma matriz factor $\left[R^{(K)}\right]$ resulta num vector $\left[B^{(1)}\right]$ dado por

$$\begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & \ddots & & & & & \\ -\dfrac{a_{j1}^{(K-1)}}{a_{jj}^{(K-1)}} & \cdots & 1 & -\dfrac{a_{jl}^{(K-1)}}{a_{jj}^{(K-1)}} & \cdots & -\dfrac{a_{jn}^{(K-1)}}{a_{jj}^{(K-1)}} \\ & & & 1 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1^{(0)} \\ \vdots \\ b_j^{(0)} \\ b_l^{(0)} \\ \vdots \\ b_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} b_1^{(1)} \\ \vdots \\ b_j^{(1)} \\ b_l^{(1)} \\ \vdots \\ b_n^{(1)} \end{bmatrix} \tag{29}$$

onde

$$b_i^{(1)} = b_i^{(0)} \qquad i \neq j$$

$$b_j^{(1)} = \sum_{l=1}^{n} -\frac{a_{jl}^{(K-1)}}{a_{jj}^{(K-1)}} \; b_j^{(0)} \tag{30}$$

Dado que $\left[R^{(K)}\right] = \left[L^{(K)}\right]'$ àparte o elemento diagonal, a multiplicação expressa pela equação (29) processa-se de um modo análogo ao descrito acima, com a diferença que apenas um elemento dos vectores $[\Delta P/U]$ e $[\Delta Q/U]$ é alterado em cada multiplicação, de acordo com a equação (30). Os elementos das matrizes [R] são procuradas nas tabelas de armazenamento em sentido inverso ao da procura das matrizes [L], isto é, a partir do último nó a ser eliminado no processo de factorização.

3.6 — Limites de potência reactiva nos nós tipo PU

Depois de completada a segunda iteração, é feito um teste à potência reactiva calculada nos nós tipo PU, comparando-a com os limites máximo e mínimo especificados. Se um destes limites for violado a potência reactiva no nó passa a ser constante e igual a este limite, isto é, o nó passa a ser do tipo PQ. Visto a convergência ser oscilatória, torna-se necessário prever a hipótese de a potência reactiva calculada voltar a entrar dentro dos limites numa iteração subsquente, passando neste caso o nó a ser novamente do tipo PU.

O tratamento dos nós tipo PU em que os limites de potência reactiva são infrigidos pode ser feito por dois métodos:

— O primeiro método consiste em acrescentar a [B''] a coluna e linha correspondentes ao nó PU em que a potência reactiva excedeu os limites e proceder a uma nova bifactorização.

— O segundo método consiste em corrigir a tensão por meio de um acréscimo AU_k em cada uma das iterações subsquentes, de forma a anular o erro $\Delta Q_k = Q_k \quad - Q_k$. O acréscimo ΔU_k relaciona-se com o erro ΔQ_k por meio de um factor de sensibilidade S_k tal que

$$\Delta U_k = S_k \frac{\Delta Q_k}{U_k} \tag{31}$$

S_k é o elemento diagonal correspondente ao nó K da matriz das impedâncias nodais, podendo admitir-se aproximadamente que esta é a inversa da matriz [B"] aumentada com a linha e a coluna referentes ao nó K. S_k é calculado apenas uma vez para os nós em que os limites foram violados, sem refactorizar a matriz [B"].

No programa desenvolvido, foi utilizado o segundo método, embora necessite de um número mais elevado de iterações, é, do ponto de vista de computação mais eficiente, já que não exige nova factorização de [B"].

Se num nó tipo PU os limites de potência reactiva são violados, esse nó é numerado em último lugar e a matriz [B"] aumentada será

$$[B'']^{+} = \left[\begin{array}{c:c} [B''] & [C] \\ \hdashline [C]^{t} & c_{nn} \end{array}\right] \tag{32}$$

Os elementos da coluna [C] e o elemento diagonal c_{nn} são detectados nas tabelas 2 e 1, respectivamente, por meio dos vectores LOC e NPROX. Estes elementos não foram alterados durante a ordenação e bifactorização.

A equação (9) escreve-se nestas condições

$$\left[\begin{array}{c} [\Delta Q/U] \\ \hdashline \Delta Q_n/U_n \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c:c} [B''] & [C] \\ \hdashline [C]^{t} & c_{nn} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} [\Delta U] \\ \hdashline \Delta U_n \end{array}\right] \tag{33}$$

Se este sistema de equações for resolvido com recurso a uma eliminação gaussiana, o elemento diagonal c_{nn} que resulta de c_{nn} é o inverso do elemento correspondente da matriz inversa de $[B'']^{+}$. O elemento c'_{nn} pode ser calculado facilmente sem inverter $[B'']^{+}$ se se atender a que o produto das matrizes factores [L] de [B"] pela coluna [C] resulta numa coluna [C'] dada por:

$$[C'] = [L''^{(n)}]\ [L''^{(n-1)}] \cdots [L''^{(1)}]\ [C] \tag{34}$$

que é idêntica à que resultaria de [C] por meio da eliminação gaussiana da matriz [B" ⁞ C]. Após esta eliminação a matriz $[B'']^{+}$ transforma-se em

$$\left[\begin{array}{c:c} [B'']^{s} & [C'] \\ \hdashline [C]^{t} & c_{nn} \end{array}\right] \tag{35}$$

onde

$$[C'] = [c'_{1n} \quad c'_{2n} \quad . \quad . \quad . \quad c'_{n-1,\,n}]^{t} \tag{36}$$

e $[B'']^{s}$ é a matriz triangular superior que resulta de [B"]. Eliminando a última linha da matriz (35), o elemento c_{nn} transforma-se em

$$c'_{nn} = c_{nn} - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{c_{jn}^{\ 2}}{l_{jj}} \tag{37}$$

O factor de sensibilidade S_k será finalmente

$$S_k = \frac{1}{c'_{nn}} \tag{38}$$

O erro ΔQ_k é calculado no fim de cada iteração usando os valores das tensões em todos os nós calculados nessa iteração. A correcção AU_k é calculada pela equação (31) e somada à tensão corrente nesse nó. Na primeira vez que é aplicada esta tensão é a especificada; nas iterações subsequentes será o valor corrigido na iteração anterior. Se, numa dada iteração, a tensão calculada toma um valor superior à tensão especificada (se o limite de potência reactiva violado for o superior) ou inferior a essa tensão (se o limite violado for o inferior), a correcção deixa de ser implementada, passando o nó a ser tratado como um nó tipo PU normal. A potência reactiva calculada (usando a tensão especificada no nó K e nos restantes nós tipo PU em que os limites não foram violados) deve no entanto continuar a ser comparada com os limites, retomando-se o processo correctivo, caso estes sejam ultrapassados.

Ainda que em dois ou mais nós sejam infrigidos os limites de potência reactiva, o factor de sensibilidade é calculado para cada um deles sem atender a se existem ou não outros nós nessas condições. As linhas e coluna correspondentes a esse nó são por conseguinte acrescentados à matriz [B"] base.

3.7 — Transformadores com regulação automática em carga

A partir da segunda iteração é também efectuado um teste à tensão nos barramentos com tensão controlada através de transformadores com mudança de tomadas automática em carga.

O algoritmo de ajuste da relação de transformação consiste basicamente no seguinte. Se numa dada iteração a relação de transformação do transformador que controla a tensão no barramento K for $m_i^{(k)}$ e se a tensão calculada U_k violar os limites máximo ou mínimo especificados, a relação de transformação é corrigida do acréscimo $\Delta m_i^{(k)}$ dado pela expressão

$$\Delta m_i^{(k)} = \pm \alpha \left(U_k - U_k^{lim} \right) \tag{39}$$

onde α é um factor empírico com as características idênticas às do ganho de uma cadeia de controlo com retroacção. No programa elaborado, um valor $\alpha = 0{,}7$ conduziu à mais rápida convergência. O valor corrigido da relação de transformação será

$$m_i^{(K+1)} = m_i^{(K)} + \Delta m_i^{(K)} \tag{40}$$

O sinal que precede α na equação (39) depende da localização do nó em que a tensão é controlada. Se este se situa do lado do enrolamento que possui as tomadas o sinal a utilizar deverá ser negativo; no caso contrário será positivo.

Após a correcção de m_i, é necessário alterar os elementos da matriz de admitâncias nodais, em virtude da modificação resultante nos esquemas equivalentes em π dos transformadores afectados. Em rigor também os elementos da matriz [B"] deveriam ser alterados, o que implicaria uma nova bifactorização. Verifica-se porém que, se a matriz [B"] permanecer constante a velocidade de convergência do método é pouco afectada [10]. Dado que neste caso não é necessário refactorizar [B"], a economia em tempo de cálculo é significativa. Os resultados obtidos pelos autores corroboram estas considerações.

A variação da relação de transformação supõe-se contínua até à convergência total, após o que se fixa no valor real mais próximo do calculado e se procede à continuação do processo iterativo até nova convergência sem alteração da relação de transformação. Note-se que, com este procedimento, é possível que em alguns barramentos as tensões estejam fora dos limites especificados; em geral estes erros são desprezáveis.

Se m_i^{min} e m_i^{max} forem respectivamente as relações de transformação mínima e máxima e Δm_i for o incremento, o valor real da relação de transformação mais próxima da calculada é

$$m_i = m_i^{min} + K \, \Delta m_i \tag{41}$$

onde K e o inteiro mais próximo de

$$FK = \frac{m_i^{cal} - m_i^{min}}{\Delta m_i} \tag{42}$$

por defeito ou por excesso consoante $|FK-K| < 0{,}5$ ou $|FK-K| \geqslant 0{,}5$ respectivamente.

4 — RESULTADOS NUMÉRICOS

O programa de cálculo descrito na secção anterior foi utilizado na solução do fluxo de potência em diversas redes, nomeadamente as redes teste de 14 e 30 barramentos do IEEE, a rede teste de 56 barramentos da EDP (18.12.74 às 11.30 horas) e a rede de 63 kV da CRGE de 70 barramentos (situação de ponta em Janeiro de 1976). Na rede de 30 barramentos do IEEE consideraram-se três casos: sem violação dos limites de potência reactiva, com uma, e com duas violações. Na rede de 56 barramentos da EDP consideraram-se dois casos: Com e sem regulação automática em carga dos transformadores. Na rede de 70 barramentos da CRGE, que inclui extensos percursos em cabo subterrâneo, estudou-se apenas o caso de transformadores com regulação automática em carga.

Os cálculos foram executados no computador IBM 360/44 do Centro de Cálculo das Universidades de Lisboa, usando precisão simples. A tolerância admitida para os erros de fecho foi de 0,05 MWMVAR; a redução desta tolerância para 0,01 MW/MVAR não revelou qualquer diferença nos valores das tensões (expressas em p.u. com 4 casas decimais).

Na tabela 1 apresentam-se alguns dados com interesse referentes às redes estudadas: valores máximos de $|\Delta P|_{max}$ e $|\Delta Q|_{max}$ após a primeira iteração e após a convergência, e o número de iterações necessário com o método do desacoplamento. Refere-se ainda o número de iterações usando o método de Newton-Raphson clássico, para efeitos de comparação. Dado que o processo iterativo com o método do desacoplamento pode terminar após uma solução da equação (8) ou da equação (9), o número total de iterações pode ser inteiro ou fraccionário.

TABELA 1

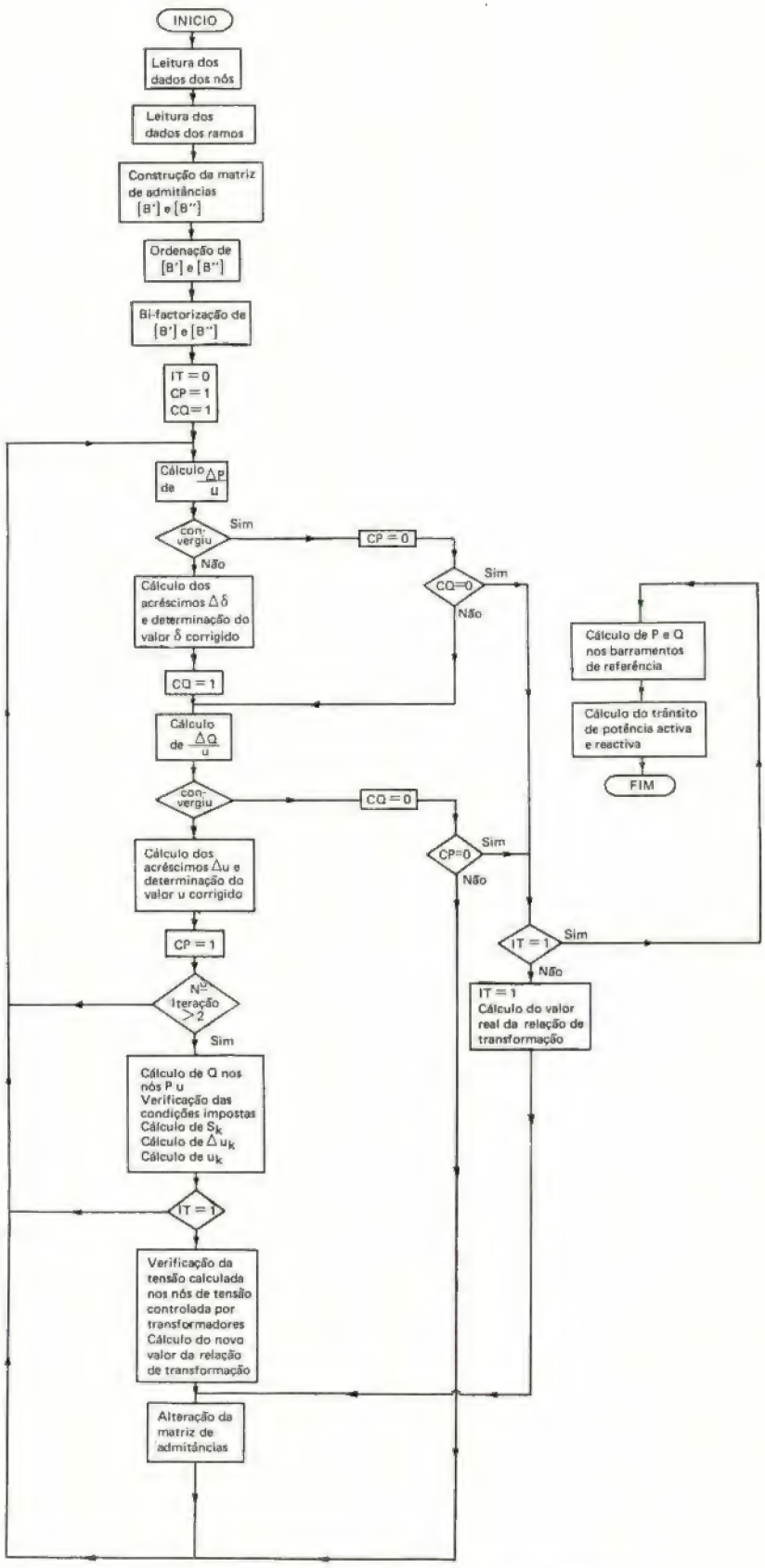
Rede	N.º de barr.	N.º de nós com Q lim violado	Regul. autom. trans.	Após iter. 1/1,5		Convergência		N.º de iterações	
				$\lvert\Delta P\rvert_{max}$	$\lvert\Delta Q\rvert_{max}$	$\lvert\Delta P\rvert_{máx}$	$\lvert\Delta Q\rvert_{max}$	Desacop.	Newton-Raphson
IEEE	14	0	NÃO	47,24	7,713	0,0063	0,0018	4	3
IEEE	30	0	NÃO	23,92	4,377	0,0040	0,0061	3,5	3
IEEE	30	1	NÃO	23,92	4,371	0,0014	0,0071	4,5	4
IEEE	30	2	NÃO	23,92	4,371	0,0122	0,0436	4,5	7
E DP	56	0	NÃO	513,47	58,30	0,0454	0,0372	5,5	4
E DP	56	0	SIM	513,47	58,30	0,0285	0,0229	13	12
CRGE	70	0	SIM	532,68	111,57	0,0179	0,0275	12	10

NOTA: Valores de $|\Delta P|$ e $|\Delta Q|$ em MW e MVAR.

Do exame dos valores da tabela 1 pode concluir-se que, do ponto de vista do número de iterações necessário para atingir a convergência, o método do desacoplamento não se afasta sensivelmente do método de Newton-Raphson. Para a rede do IEEE de 30 barramentos com duas infracções de limites de potência reactiva, o número de iterações pelo método do desacoplamento é mesmo inferior ao número de iterações pelo método de Newton-Raphson. Dado que cada iteração pelo primeiro método é muito mais rápida que pelo segundo, o tempo total de cálculo é substancialmente menor pelo método do desacoplamento.

Na tabela 2 apresenta-se uma decomposição do tempo total de cálculo, pelo método do desacoplamen to, para a rede do IEEE de 30 nós, sem violação dos limites de potência reactiva.

De salientar os tempos extremamente curtos para a ordenação e bifactorização. Os tempos de leitura de dados e de formação das matrizes [Y], [B'] e [B''] é comparativamente maior. Excluindo o tempo tomado pela saída de resultados que constitui 89 % do tempo total de duração do programa, pode verificar-se que o cálculo iterativo das tensões (3.5 iterações) demora apenas 0,6 s, isto é, 15 % do tempo total de cálculo.



TRÂNSITO DE POTÊNCIA PELO MÉTODO DO DESACOPLAMENTO

FLUXOGRAMA GERAL

TABELA 2

Módulo	Tempo	
	s	%
— Leitura de dados e formação de [Y], [B'] e [B"]	3,0	8,4
— Ordenação	0,2	0,6
— Bifactorização	0,1	0,3
— 3.5 iterações	0,6	1,7
— Saída de resultados	32,0	89,0
— Total	35,9	100,0

5 — CONCLUSÕES

O método do desacoplamento apresenta-se presentemente como uma alternativa superior ao método de Newton-Raphson, para a solução do fluxo de potência numa rede de energia, quer em exigências de memória, quer em velocidade de cálculo.

Neste artigo dá-se conta do programa desenvolvido no Centro de Electrotecnia das Universidades de Lisboa utilizando este método, designadamente das técnicas de programação apropriadas às matrizes esparsas, cuja aplicação ao cálculo de redes eléctricas permite reduções espectaculares da capacidade de memória do computador e do tempo de cálculo. O uso da ordenação dinâmica das linhas e colunas das matrizes [B'] e [B"] combinada com a bifactorização revelou-se extremamente eficiente do ponto de vista de velocidade de cálculo e simplicidade de programação quando comparado com outros métodos, designadamente a transformação [L] [D] [H], usada por Stott.

Os resultados obtidos para as diversas redes testadas, embora ainda limitadas, revelaram-se satisfatórios, nomeadamente quanto à verificação da superioridade do método do desacoplamento em relação ao método de Newton-Raphson clássico. O número de iterações, para a mesma tolerância, é apenas ligeiramente superior na maioria dos casos, sendo igual num caso e mesmo inferior num outro.

Presentemente os autores investigam a aplicação do método à análise de contingências.

6 — REFERÊNCIAS

[1] — **Ward, J. B. e Hale, H. W.:** «Digital computer solution of power flow problems». Transactions AIEE, VoVl. 75, pags. 398-404, Junho 1956.

[2] — **Glimn, A. F. e Stagg, G. W.:** «Automatic calculation of load flows». Transactions AIEE, Vol. 76, pags. 347-355, Junho 1957.

[3] — **Van Ness, J. E. e Griffin, J. H.:** «Elimination methods for load-flow studies». Transactions AIEE, Vol. 80, pags. 299-303, Junho 1961.

[4] — **Tinney, W. F. e Hart, C. E.:** «Power flow solution by Newton's method». IEEE Transactions, Vol. PAS-86, N.º 11, pags. 1449-1460, Novembro 1967.

[5] — **Tinney, W. F. e Walker, J. W.:** «Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization». Proceedings IEEE, Vol. 55, pags. 1801-1809, Novembro 1967.

[6] — **Ogbuobiri, E. C., Tinney, W. F. e Walker, J. W.:** «Sparsity-directed decomposition of Gaussian elimination on matrices». IEEE Transactions, Vol. PAS-89, N.º 1, pags. 141-149, Janeiro 1970.

[7] — **Stott, B. e Hobson, E.:** «Solution of large power-system networks by ordered elimination: a comparison of ordered schemes». Proceeding IEE, Vol. 118, N.º 1, pags. 125-134, Janeiro 1971.

[8] — **Despotovic, S. T.:** «A new decoupled load-flow method». IEEE Transactions, Vol. PAS-93, N.º 3, pags. 884-887, Maio/Junho 1974.

[9] — **Stott, B.:** «Decoupled Newton load flow». IEEE Transactions, Vol. PAS-91, N.º 5, pags. 1955-1959, Setembro/Outubro 1972.

[10] — **Stott, B. e Alsac, O.:** «Fast decoupled load flow». IEEE Transactions, Vol. PAS-93, pags. 859-869, Maio/Junho 1974.

[11] — **Stott, B.:** «Review of load-flow calculation methods». Proceedings IEEE, Vol. 62, N.º 7, pags. 916-929, Julho 1974.

[12] — **Sasson, A. M. e outros:** Comments on «Review of load-flow calculation methods». Proceedings IEEE, Vol. 63, pags. 712-713, Abril 1975.

[13] — **Vervlot, F. G. e Brameller, A.:** «A. C. security assessment». Proceedings IEE, Vol. 122, N.º 9, pags. 891-902, Setembro 1975.

[14] — **Sucena Paiva, J. P.:** «Controlo em tempo real dos sistemas de energia eléctrica». Parte I — Trânsito de potências a estimação de estado». Electricidade.

[15] — **Sucena Paiva, J. P.:** «Análise de redes de energia eléctrica». Edição da Associação dos Estudantes do I. S. T., Lisboa, 1977.

[16] — **Brameller, A., Allan, R. N. e Haman, Y. M.:** «Sparsity». Pitman Publishing, London, 1976.

[17] — **Zollenkopf, K.:** «Bi-factorization-basic computation algorithm and Programming Techniques», in Large Sparse Sets of Linear Equations, Academic Press, pags. 75-95, 1971.

7 — ANEXOS

7.1 — Simbologia

a_{ij} — elemento da matriz [A].

b'_{ij} — elemento da matriz [B'].

b''_{ij} — elemento da matriz [B"].

B_{ij} — parte imaginária de $[Y_{ij}]$.

G_{ij} — parte real de $[Y_{ij}]$.

H_{ij} — elemento da submatriz [H].

J_{ij} — elemento da submatriz [J].

L_{ij} — elemento da submatriz [L].

N_{ij} — elemento da submatriz [N].

m_i — relação de transformação do transformador i.

n — número de barramentos da rede.

P_i — potência activa injectada no barramento i.

Q_i — potência reactiva injectada no barramento i.

R_{ij} — resistncia do ramo i—j.

S_k — factor de sensibilidade do barramento K.

U_i — módulo da tensão V_i.

V_i — tensão no barramento i.

X_{ij} — reactância do ramo i—j.

Y_{ij} — elemento da matriz de admitâncias nodais [Y].

δ_i — argumento da tensão V_i.

$\Delta\delta_i$ — correcção do argumento da tensão δ_i.

ΔP_i — erro de fecho da potência activa no barramento i.

ΔQ_i — erro de fecho da potência reactiva no barramento i.

ΔU_i — correcção do módulo da tensão U_i.

7.2 — Formulação do método do desacoplamento

Retomem-se as equações (6) e (7)

$$[\Delta P] = [H]\ [\ \Delta\delta\ ] \tag{6}$$

$$[\Delta Q] = [L]\ [\Delta U/U] \tag{7}$$

onde os elementos de [H] e [L] são dados pelas equações (4a), (5a) e (5b).

Atendendo a que, na generalidade das redes de energia, são válidas as seguintes aproximações:

$$\cos(\delta_i - \delta_j) \simeq 1 \; ; \quad G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \ll B_{ij} \; ; \quad Q_i \ll B_{ii} \, U_i^2$$

as equações (4a), (5a) e (5b) simplificam-se para

$$H_{ij} = L_{ij} = - U_i \, B_{ij} \, U_j \qquad i \neq j \tag{43}$$

$$H_{ii} = L_{ii} = - U_i \, B_{ii} \, U_j \tag{44}$$

A linha i das equações (6) e (7) será

$$\Delta P_i = - \sum_{j=2}^{n} U_i \, B_{ij} \, U_j \, \Delta\delta_j \tag{45}$$

$$\Delta Q_i = - \sum_{j=2}^{n} U_i \, B_{ij} \, U_j \, \Delta U_j \qquad i = 2, \ldots, n \tag{46}$$

ou ainda

$$\frac{\Delta P_i}{U_i} = - \sum_{j=2}^{n} B_{ij} \, U_j \, \Delta\delta_j \tag{47}$$

$$\frac{\Delta Q_i}{U_i} = - \sum_{j=2}^{n} B_{ij} \, \Delta \, U_j \tag{48}$$

NOTA: Admite-se que existe apenas um nó de balanço, que recebe o n.º 1.

Sob forma matricial compacta as equações (45) e (46) escrevem-se

$$[\Delta P/U] = [B'] \; [U] \; [\Delta\delta] \tag{49}$$

$$[\Delta Q/U] = [B''] \; [\Delta U] \tag{50}$$

Eliminando a influência do fluxo de potência reactiva no cálculo de $\Delta\delta$ (equação (49)), para a que se igualam a 1.0 p.u todos os elementos da matriz diagonal [U], as equaçes transformam-se finalmente em

$$[\Delta P/U] = [B'] \; [\Delta\delta] \tag{51}$$

$$[\Delta Q/U] = [B''] \; [\Delta U] \tag{52}$$

Em princípio as matrizes [B'] e [B''] coincidem com a matriz [−B] (simétrica da matriz das susceptâncias nodais [B]). Levando o processo do desacoplamento até as suas últimas consequências, não se consideram porém na formação de [B'] os elementos que afectam especialmente o trânsito de potência reactiva: capacidades ou induções em derivação (incluindo capacidades das linhas) e transformadores com relação de transformação variável. Também no cálculo de [B'] se despreza a resistência dos ramos da rede. Este ponto é de maior importância do que Stott sugere, pois a inclusão das resistências nos elementos de [B'] resulta num maior número de iterações até à convergência e pode mesmo conduzir à divergência do processo iterativo.

Na formação da matriz [B''] ignora-se a eventual presença de desfasadores. Na matriz [B'] podem ser consideradas, o que, porém, resulta na destruição da simetria numérica desta matriz. É portanto preferível representá-los por meio de métodos alternativos.

NÚMERO 445/446 DEZEMBRO 1977/JANEIRO 1978 ANO LII/LIII VOLUME XXXIX

C. D. U. 622.2:519.3

Optimização do beneficiamento de sistemas de jazidas minerais

[Apropriação racional dos recursos minerais]

JOSÉ QUINTINO ROGADO (1)

RESUMO

No planeamento a níveis nacional ou regional e também no âmbito de uma grande empresa responsável por vários depósitos minerais, é-se conduzido ao problema da optimização global de sistemas de jazidas, os quais podem conter minérios diferentes.

Tomando como constrangimentos a taxa anual de produção de minério tal-qual e o teor mínimo dos concentrados aceite pelos utilizadores, o objectivo consiste em optimizar duas funcionais simultaneamente: a perda total em metal e a margem monetária global não actualizada.

Para resolver este problema, usa-se a «função característica», já apresentada noutra oportunidade, mediante um processo de «homogenização» que se traduz na utilização de «teores reduzidos».

Deste modo, constroi-se a função característica global do sistema e pode obter-se facilmente a margem monetária optimizante que conduz à perda mínima em metal compatível com os constrangimentos.

O programa CARACT que optimiza as duas mencionadas funcionais é sumarizado e algumas das suas virtualidades analisadas.

ABSTRACT

When planning for large areas, say a country, a mining district, or a great concern responsible for several mines, the exploitation and beneficiation policies deal with complex systems.

In a global view point, the best *objective is to minimize the overall loss of metals and to maximize the total non-discounted monetary margin.*

The most important constraints framing the resolution of such a problem are the minimum (or the maximum) grade levels of the concentrates to be produced and the annual rates of production admissible by the market.

The method developed in this paper is a quite general one and uses the concept of characteristic function *elsewhere developed by means of an* homogenization *process which leads to consider the deposits set as a sole ore body, even if far apart ore bodies there exist.*

The computer program CARACT (built up for the a. m. method) is outlined and results already obtained with it are summarized.

Finally, among other suggestions, the possibility of using this method for the evaluation of mineral resources in world scale, is advanced.

1 — A FUNÇÃO CARACTERISTICA OPTIMAL

É sabido [5] que a escolha de critérios de rejeição e correlativa definição da massa minerável de qualquer jazida só têm significado quando baseados em blocos com alguma representatividade tecnológica no que concerne à futura exploração.

Por outro lado, critérios de rejeição baseados no teor tal-qual enfermam de aproximação grosseira [2], que consiste em admitir que a recuperação em metal daquele não depende.

Assim, a construção do critério económico a optimizar deve considerar (excepto em casos triviais) os resultados previsíveis da concentração e, se possível, da própria metalurgia ou processamento químico subsequente. Reconhece-se assim a necessidade de explicitar sucessiva integração vertical na elaboração das políticas de exploração da maioria das jazidas, quanto mais não seja para racionalizar as tradicionais «fórmulas de venda».

A importância do bloco de exploração, acima indicada, conduz, já por si, à partição da jazida que, deste modo, se torna sistema discreto. E, quando os resultados da mineralurgia forem tomados em consideração, serão associações de blocos de exploração (constituindo blocos mineralúrgicos) que há que con-

(1) Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico. Departamento de Mineralurgia e Planeamento Mineiro. C. V. R. M. U. L. — I. N. I. C.

(Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977).

siderar, já que a covariância dos parâmetros de controlo mineralúrgico é mais forte do que a existente entre os teores tal-qual.

O problema que então se põe é encontrar para cada um daqueles blocos a forma mais adequada de beneficiamento.

É cada vez melhor aceite que a política desejável consiste em maximizar a margem monetária global não actualizada, minimizando, simultaneamente, a perda em metal (ou em metais) de valor [5].

Se a reserva total Q «eventualmente» explorável for conhecida e se a taxa anual de extracção r for fixada, tal margem B será (v. lista de símbolos)

$$B = Up - \left(fC + M(Q, r) + L(Q, r)\right) \qquad (1)$$

Mostra-se [3], quando as alternativas de beneficiamento conduzem a custos quase constantes, que o teor T do concentrado global é atingido com perdas em metal U e monetária mínimas se a funcional

$$I = \int_{To}^{T} |dT/dU| \, dT \qquad (2)$$

for minimizada; o que corresponde a encontrar, considerando o conjunto

$$A = \left\{E : E = \triangle R / \triangle (R\,t)\right\} \qquad (3)$$

o sup E $\subset$ A cuja configuração de tratamento dos painéis da jazida conduz ao valor de T fixado.

Variando T, constroi-se no espaço U×C, a «curva característica (optimal)» da jazida na vizinhança de determinado processo de tratamento (ou de classe estreita (1) de processos de tratamento).

E, se nos planeamentos sucessivos que se forem fazendo, os processos tecnológicos houverem sido bem escolhidos, em face do progresso técnico coevo e das características então conhecidas da jazida, as correspondentes curvas características podem gerar curvas de Lasky: Na época em que foram construídas traduziam a solução optimal ideal para o aproveitamento da jazida, a qual não dependia dos valores de Q e r que se vieram a fixar.

O interesse de qualquer projecto de beneficiamento que se caracteriza por M(Q, r) + L(Q, r), que se insere no mercado através de p, e toma em conta a localização da jazida, graças a f, pode avaliar-se à custa da curva característica da jazida.

Com efeito, sendo a margem monetária global não actualizada expressa em unidades do preço pro-rata do metal de valor, dada por

$$B/p = U - G \quad ,$$

basta procurar o sup $\{U - G\}$ para determinar a tríada $(\hat{U}, \hat{C}, \hat{T})$ optimal. A viabilidade económica do projecto resultará, portanto, de ser sup $\{U - G\} \geqslant 0$.

Se tal não ocorrer e não se desejar explorar mina subvencionada, haverá que alterar o projecto ou rejeitar blocos mineralúrgicos.

A análise da política de rejeição conduz à conclusão que a solução optimal (com mínima perda em metal) consiste em abandonar, em prioridade, os blocos que conduzirão a menores teores de concentrado [1].

2 — O PROCESSO DE HOMOGENIZAÇÃO

2.1 — Quando se ultrapassa a micro-análise, por exemplo, quando um sistema constituído por jazidas diferentes tem de ser considerado como um todo, a maximização da margem monetária global não actualizada e a simultânea minimização da perda em metal tornam-se problemas mais intrincados. Situações como esta ocorrem quando o projectista (ou o gestor) encara o planeamento a nível nacional ou regional ou no âmbito de grande empresa concessionária de vários depósitos minerais.

Há, contudo, em geral, certa informação, na fase em que o projectista intervem, a qual permite, até certo ponto, enquadrar a situação. Assim, são conhecidas as reservas minerais e a taxa anual de produção futura de cada concentrado pode ser fixada com margem de indeterminação não excessiva, depois de estudo individual das próprias jazidas, feita triagem de uns tantos processos de beneficiamento e após a análise dos mercados absorvedores dos futuros concentrados. Deste modo, porque fica definido aproximadamente o rendimento em peso, pode fixar-se a taxa anual individual de mineração e, consequentemente, a vida de cada depósito.

Por outro lado, o projectista deve admitir que a política que vai adoptar será revista periodicamente (de 5 em 5 anos, de 10 em 10 anos, etc.) e ainda sempre que a conjuntura económica e/ou social houverem claramente mudado.

Mesmo assim, uma das maiores dificuldades consiste em comparar o valor de venda e, consequentemente, o valor das perdas dos diversos metais a produzir pelo sistema de jazidas.

Com efeito, nem sempre meros critérios económicos podem ser adoptados. A exaustão relativa das reservas disponíveis no sistema, a degradação dos teores dos respectivos minérios «in situ» e as suas relações com o senário tecnológico, porventura a importância estratégica de alguns metais, etc., são factores de influência «vaga» que o projectista deverá tomar em consideração, o que, aliás, pode ser feito atribuindo ponderadores diferentes aos valores dos diferentes metais.

Por outro lado, em cada época em que se fizer o planeamento, o progresso técnico e os «hábitos» industriais fixam os teores mínimos das espécies de valor e os teores máximos das espécies prejudiciais

(1) Estreita para que o pressuposto da constância de L seja válido.

dos concentrados a produzir. Trata-se de constrangimentos muito fortes que, mesmo ao nível de planeamento nacional, não podem facilmente ser mitigados. Importa, por isso, que o método de planeamento os possa tomar explicitamente em consideração.

2.2 — Suponha-se então que o sistema S, cujo beneficiamento se pretende planear, é constituído por n depósitos D_i: $S = \{D_i : i \in (1, n)\}$. A cada depósito estão alocadas a reserva em minério tal-qual Q_i, a taxa anual de mineração r_i, o custo global de mineração e tratamento $M_i(Q, r) + L_i(Q, r)$ e, também, o valor por unidade de metal p_i (pro-rata), além dos custos de transporte f_i por unidade de peso do concentrado até FOB ou CIF.

Considerando a união de todos os depósitos $\bigcup D_i$ obtém-se novo conjunto $H = \{V_{ij} : i \in (1, n), j \in (1, m_i)\}$ constituído pelos blocos mineralúrgicos, a cada um dos quais se alocaram alguns pontos (sejam 3 a 6) da função de lavabilidade R(t), à custa de testes normalizados representativos do(s) processo(s) escolhido(s).

Adoptem-se os ponderadores $a_i : i \in (1, n)$ para os preços de venda dos metais a produzir e um dos metais e uma das minas como referencial. Defina-se:

$$U_i^* = (a_i \cdot p_i/p_o) \cdot U_i \qquad a_o = 1 \quad i \in (1, n)$$

$$C_i^* = (f_i/f_o) \cdot C_i$$

como o peso «reduzido» do metal (contido) no concentrado a produzir e o peso «reduzido» deste, respectivamente.

Consequentemente, o peso reduzido global de metal será

$$\overline{U} = \sum \left(U_i : i \in (1, n) \right)$$

e o peso reduzido global do concentrado

$$\overline{C} = \sum \left(C_i : i \in (1, n) \right)$$

Obviamente, os custos globais de mineração e tratamento serão, respectivamente

$$\overline{M} = \sum \left(M_i : i \in (1, n) \right)$$

$$\overline{L} = \sum \left(L_i : i \in (1, n) \right)$$

Assim fazendo, uma vez que se haja escolhido um par (R_{ij}, t_{ij}) para cada V_{ij}, a margem monetária global da exploração de S até à exaustão (em face das reservas conhecidas) será

$$\sum B_i = \overline{U}\, p_o - (\overline{C}\, f_o + \overline{M} + \overline{L}) \qquad (4)$$

relação que é formalmente análoga a (1) e que permite definir um teor generalizado global para o conjunto dos concentrados a produzir, a saber

$$\overline{T} = \overline{U}/\overline{C} = f_o/p_o \left(\sum U_i\, a_i\, p_i / \sum C_i\, f_i \right)$$

A relação (4) traduz, assim, o processo de homogenização a que vai recorrer-se, para efeitos de cálculo.

3 — GENERALIZAÇÃO DA FUNÇÃO CARACTERÍSTICA OPTIMAL

3.1 — Como se referiu, a função característica optimal de uma jazida traduz as configurações de tratamento que conduzem, para dado T, à menor perda em metal.

Considere-se agora o espaço auxiliar $\overline{U} \times \overline{\overline{T}} \subset R^2$ onde é

$$\overline{\overline{T}} = (1/p_o) \cdot \left(\sum U_i\, a_i\, p_i / \sum C_i \right) = \overline{T}/f_o.$$

Nesse espaço, a maximização da funcional

$$\overline{I} = \int_{\overline{\overline{T}}_o}^{\overline{\overline{T}}} \left| d\overline{\overline{T}}/d\overline{U} \right| d\overline{\overline{T}}$$

garante que qualquer $\overline{\overline{T}}$ é atingido com a perda mínima em metal. Portanto, considerando agora o conjunto

$$\overline{A} = \left\{ \overline{E} : \overline{E} = \triangle R / \triangle (Rt^*) \right\},$$

encontrando-se o sup $\overline{\overline{E}} \subset \overline{A}$ cuja configuração de tratamento dos painéis do sistema conduz ao valor fixado de $\overline{\overline{T}}$, assegura-se tal teor com perda mínima.

E, como é óbvio, variando $\overline{\overline{T}}$, constrói-se a relação $\overline{U}(\overline{\overline{T}})$ optimal, isto é, correspondente às perdas mínimas em $\overline{U}$.

Esta relação induz no espaço $\overline{U} \times \overline{C}$ a função característica optimal $\overline{U}(\overline{C})$ da forma que se referiu em 2.1, «mutatis mutandi». Esta função $\overline{U}(\overline{C})$ diz respeito a conjunto de processos de tratamento (ou de classes estreitas de processos de tratamento) e permite também avaliar o interesse de determinado conjunto de projectos aplicáveis às jazidas do sistema. Com efeito, basta, para tanto, procurar o sup $\{\overline{U} - \overline{G}\}$ e verificar se não será inferior a zero.

3.2 — Se for sup $\{\overline{U} - \overline{G}\} \geq 0$, o sistema pode ser explorado com margem não negativa.

Ficam assim, para cada bloco de tratamento V_{ij} de cada jazida D_i, definidos, em condições macro-optimais, o rendimento em peso R_{ij}, o teor t_{ij} e o rendimento em metal η_{ij} do concentrado respectivo, o que permite reconstituir para cada D_i a correspon-

dente função característica (macro-optimal) $U_i(C_i)$ e a margem monetária global não actualizada $U_i - G_i$.

Pode então dar-se o caso de algumas jazidas apresentarem margens negativas. Mas, mesmo nesta situação, o processo de homogenização atrás desenvolvido define a melhor forma de explorar cada depósito mineral integrado no sistema, tomando em consideração os constrangimentos.

As jazidas com margens positivas criaram um fundo de acumulação que permite explorar o sistema com margem não negativa e tal fundo foi constituído garantindo a perda mínima global possível em metal, em face do progresso técnico coevo e do conjunto de preços de venda e de transporte então praticados.

Esta é, sem duvida, uma das grandes vantagens da análise macro-económica apresentada.

3.3 — Por outro lado, é habitual existirem limites (inferiores) superiores para os teores dos diferentes concentrados em espécies de valor (prejudiciais), os quais são fixados rigidamente pelo mercado dos utilizadores, o que traduz, como se mencionou, determinados hábitos tecnológicos aparentemente sempre justificáveis.

Assim sendo, a construção de $\overline{U}(\overline{C})$ não é livre. Há que limitar as configurações mineralúrgicas autorizadas à restrição de conduzirem, para cada depósito D_i, a teores acima (abaixo) dos fixados como soleira (teto) de rejeição comercial.

4 — RESUMO DO PROGRAMA «CARACT»

4.1 — O princípio estruturante expresso pelo operador sup $\overline{E}$ (fixado $\overline{\overline{T}}$) torna possível e prático a construção da função característica optimal de um sistema de jazidas recorrendo a computador, por dispensar o cálculo combinatório.

A fig. 1 resume o programa CARACT, que simultaneamente calcula a característica $\overline{U}(\overline{C})$, a margem monetária optimal sup $\{\overline{U} - \overline{G}\}$ e U_i, C_i, T_i, G_i e os blocos rejeitados para cada uma das jazidas, satisfazendo a vários constrangimentos, a saber:

(i) teores dos concentrados individuais acima (abaixo) das soleiras (tetos);
(ii) margens monetárias individuais condicionadas (opcional);
(iii) margem moneteária global duplamente condicionada.

É evidente que o programa é também utilizável para uma jazida única, porquanto a ROTINA DE HOMOGENIZAÇÃO, nesse caso não actuará.

5 — VIAS DE APROPRIAÇÃO RACIONAL DOS RECURSOS MINERAIS

A escolha de Y muito grande e de $X=0$ permite obter $\overline{U}(\overline{C})$ descondicionada da economia de apropriação, isto é, a função característica optimal apenas condicionada pela conjuntura tecnológica de juzante, a qual é expressa pelas soleiras (tetos) de teores.

Tornadas as soleiras nulas (os tetos muito grandes) constrói-se a função característica descondicionada daquela conjutura.

Realizando os dois descondicionamentos, obtém-se a função característica optimal específica da tecnologia de beneficiamento coeva.

Se, à escala mundial, se empreendesse a construção de função característica global, era por esta última versão que importava iniciar a construção de políticas de preços e de soleiras (e tetos) de teores que assegurassem a melhor apropriação possível dos recursos minerais do Planeta em face do progresso técnico disponível.

Também, em escala mais reduzida, por exemplo, em países em via de lançar ou rever a política de aproveitamento dos seus recursos minerais, ou em associações de produtores de minérios, a utilização das diversas versões da função característica optimal é, sem dúvida, de utilidade extrema. A dificuldade do seu emprego reside apenas na constituição de banco de dados que permita a criteriosa construção de tal função e a sua revisão periódica.

Assim, a consideração das funções características é básico para a estruturação do que se pode chamar os programadores nacionais de empreendimentos mineiros [4].

Em mais detalhe, a função característica permite orientar as negociações para a fixação dos preços dos metais e das tarifas de transporte [5] porque explicita as consequências globais referentes à totalidade das reservas minerais afectadas em termos de perda em metal e margem monetária não actualizada e induz a representação (classificação das jazidas) como afixos do espaço [valor do metal recuperável maximal, $\hat{V}$ × margem monetária maximal, $\hat{B}$] $\subset R^2$.

Esta classificação sugerirá a necessidade de incrementar a investigação e o desenvolvimento e também de alterar os condicionantes a juzante, no sentido de aumentar as margens das jazidas com menor relação $\hat{B}/\hat{V}$. Serão tais jazidas as que, em prioridade, devem ser chamadas a contribuir, no futuro, no necessário processo de acumulação. O método descrito tem, portanto, virtualidades diacrónicas que poderão vir a orientar opções racionais na apropriação dos recursos minerais.

No pormenor, refira-se apenas que o programa CARACT permite tratar rapidamente sistemas para os quais o uso de combinatória tornaria a utilização do ordenador extremamente dispendiosa ou impossível. Num exemplo apresentado [5] encontra-se em 15 segundos a função característica que, de outro modo calculada, exigiria que se lidasse com combinatória de 37 820 configurações.

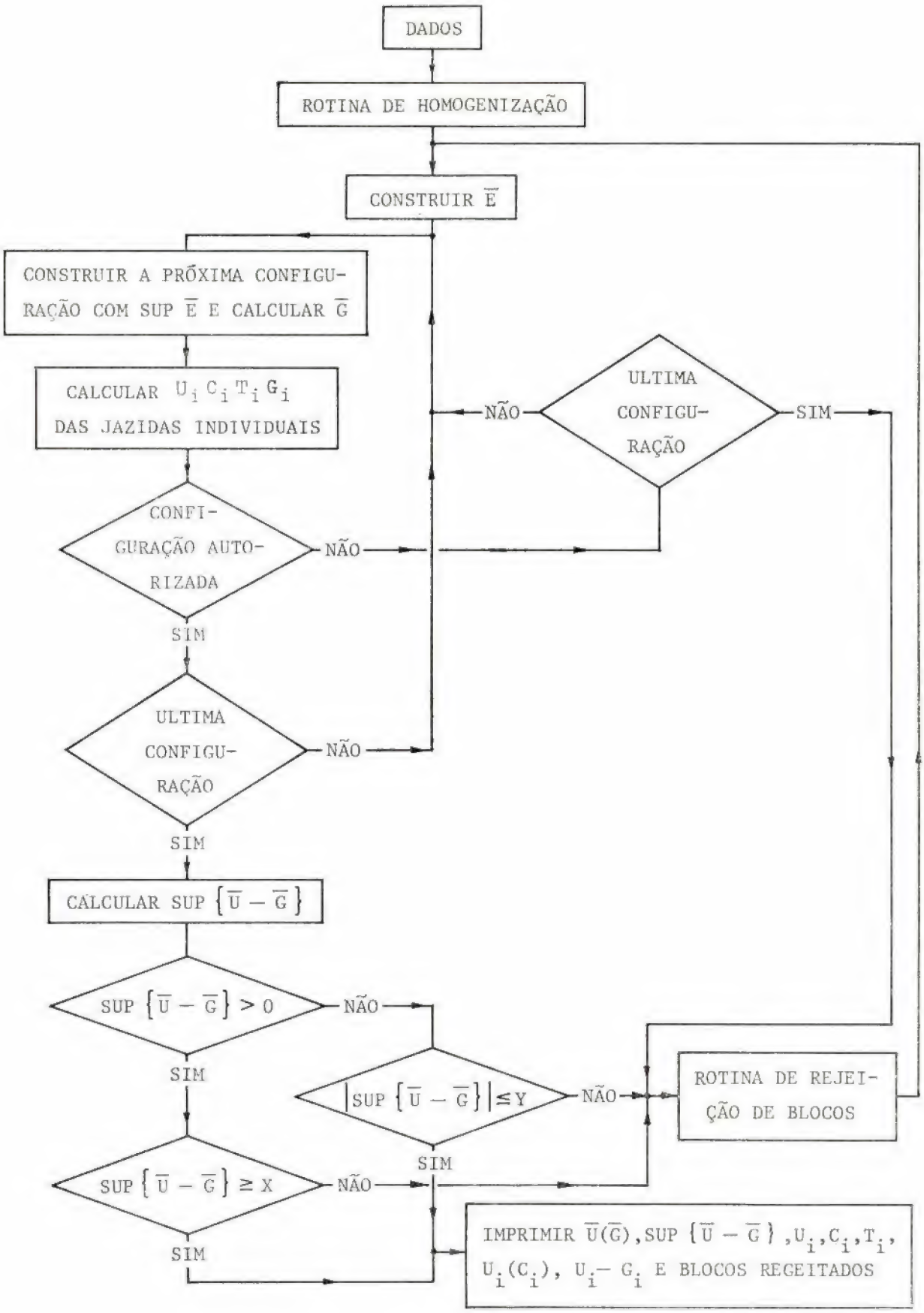


Fig. 1
Fluxograma do programa CARACT

6 — LISTA DE SÍMBOLOS NÃO DEFINIDOS NO TEXTO

6.1 — Referentes a uma única jazida

Q — reserva total «eventualmente» explorável

B — margem monetária total não actualizada

p — valor da unidade de metal («pro-rata»)

f — frete por unidade de peso de concentrado

M — despesa total de mineração

L — despesa total de tratamento

r — taxa anual de mineração do tal-qual

T — teor do concentrado global

U — metal contido no concentrado global

R — rendimento em peso genérico; η rendimento em metal genérico

t — teor genérico do concentrado; $\triangle$ operador transferência [2]

C — peso do concentrado global

G $= 1/p.\left(fC + M(Q, r) + L(Q, r)\right)$ despesas totais de transporte, lavra e tratamento expressas em unidades «pro-rata» de metal

6.2 — Referentes a sistemas de jazidas

p_i — valor da unidade do metal i

f_i — frete por unidade de peso do concentrado i

p_o — «pro-rata» de referência

f_o — frete de referência

U_i — metal contido no concentrado global i

C_i — peso do concentrado global i; $T_i = U_i/C_i$ teor idem

R_{ij} — rendimento em peso do concentrado produzido pelo bloco mineralúrgico j da jazida i; t_{ij} teor do concentrado idem; η_{ij} rendimento em metal idem

t^* — teor do concentrado genérico $<> t_{ij}\ a_i\ p_i/p_o \ \forall\ i, j$

V_{ij} — denominação e massa do bloco mineralúrgico j da jazida i

B_i — margem monetária total não actualizada da jazida i

$\overline{G}$ $= 1/p_o.\ (f_o\ \overline{C} + \overline{M} + \overline{L})$ despesas totais de transporte, lavra a tratamento do sistema, expressas em unidades «pro-rata» do metal de referência

X e Y — constantes arbitrárias positivas

G_i $= 1/p_i.\left(f_i C_i + M(Q_i, r_i) + L(Q_i, r_i)\right)$

m_i — número de pontos de funcionamento mineralúrgico do bloco i

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] **Rogado, J. Q., 1975** — «Sequential optimization method for dressing control of ore bodies (I)». 7th Mining Pribram in Science and Technique. Pribram, Checoslováquia, Out. 1975.

[2] **Rogado, J. Q., 1975** — «Sequential optimization method for dressing control of ore bodies (II)». 13th International Symposium on the Applications of Computers and Mathematics for Decision Making in Mineral Industries. Tech. Univ. Clausthal, Rep. Fed. da Alemanha, Out. 1975.

[3] **Rogado, J. Q., 1976** — «Introdução ao Planeamento Mineiro Geostatístico». Curso regido na Universidade de S. Paulo, Brasil, Maio 1976.

[4] **Rogado, J. Q., 1976** — «Nota sobre a apropriação dos recursos minerais. Programador nacional de empreendimentos mineiros». *Técnica* n.º 434, Lisboa, Portugal, Março 1976.

[5] **Rogado, J. Q., 1977** — «The global parametrization of sets of several different ore deposits». 8th Mining Pribram in Science and Technique. Pribram, Checoslováquia, Out. 1977.

Resumo dos Artigos publicados na «Técnica» n.os 445/446

Ano LII / LIII — Dezembro 1977 / Janeiro 1978

C. D. U. 378.962

E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA

QUE FUTURO PARA O I. S. T. ?

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 129 a 138

Consideram-se vários pontos básicos dos quais depende o futuro do Instituto Superior Técnico: os problemas da organização geral do ensino da engenharia no País, do tipo e quantidade dos discentes, do corpo docente, da formação de professores através dos cursos de pós-graduação, do serviço docente em tempo inteiro, da organização da investigação dentro da Escola e das relações com a Indústria.

C. D. U. 378.962:62.001

L. VALADARES TAVARES

ENSINO DE ENGENHARIA E TRANSFORMAÇÃO DA SOCIEDADE

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 139 a 142

Neste trabalho analisa-se a acção profissional dos engenheiros no contexto dos processos de transformação da sociedade mostrando-se não ser actualmente possível nem desejável deduzir as suas necessidades de formação a partir de um quadro estático de previsões feitas a curto ou a médio prazo. Em contrapartida, traçam-se algumas linhas de evolução julgadas mais importantes e a partir desta análise de tendências apontam-se diversos objectivos para o ensino de Engenharia em Portugal.

Em conformidade com estas orientações apresentam-se ainda algumas sugestões relativas ao conteúdo e à estrutura do ensino de Engenharia.

C. D. U. 378.962

JOSÉ MANUEL FONSECA DE MOURA

ENSINO E ESCOLAS DE ENGENHARIA: TÓPICOS PARA DISCUSSÃO

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 143 a 152

Analisa-se o ensino e os tipos de escolas de engenharia, abordando quatro tópicos, nomeadamente a estrutura curricular, os graus e títulos outorgados, algumas questões pedagógicas, as funções e o enquadramento do pessoal docente. Como princípios orientadores têm-se a profissionalização da escola, o carácter formativo do seu ensino e sua integração no contexto social. Como metodologia distinguem-se na discussão os níveis global e local. O primeiro corresponde aos objectivos básicos. O segundo permite a flexível adaptação destes ao contexto.

C. D. U. 378.962:371.214

JOSÉ MANUEL FONSECA DE MOURA

PLANIFICAÇÃO DO CALENDÁRIO ESCOLAR

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 153 a 156

Nesta comunicação estuda-se a organização do calendário do ano escolar das escolas de engenharia, considerando dois níveis de planificação. No global estabelece-se a divisão do ano escolar em dois grandes períodos — o ano lectivo e o período complementar. No local defende-se a quantificação da actividade escolar e, a partir desta, uma nova distribuição dos tempos lectivos.

C. D. U. 371.3:378.962

MARIA DE LOURDES TEDESCHI BETTENCOURT
ALFREDO MANUEL FLORENÇO TOVAR DE LEMOS

EXPERIÊNCIA EM PEDAGOGIA DE GRUPO

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 157 a 164

Dá-se conta dos princípios pedagógicos que constituem o apoio científico da pedagogia de grupo e caracteriza-se a situação circunstancial em que decorreu a experiência nos anos de 1970/71 e 72, envolvendo um total de cerca de 100 alunos. Transcreve-se, em resumo, e a partir dos relatórios feitos pelos alunos participantes na experiência, as conclusões que defendem a pedagogia de grupo, como um processo natural de aprendizagem humana. Considerou-se como fundamental nesta experiência a formação que permite a inserção dos futuros engenheiros na actividade profissional, onde se afirmem como técnicos de elevado nível e como pessoas em perfeito e harmonioso equilíbrio.

C. D. U. 62.001.5

PEDRO LOURTIE
VENTURA SAMPAIO
NELSON ESTEVES
MÁRIO CORDEIRO

DA INVESTIGAÇÃO AO PROJECTO DE ENGENHARIA

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 165 a 168

Faz-se uma análise da actual estrutura da Engenharia em Portugal, de investigação, desenvolvimento e projecto, apontando-se vias de solução de alguns dos defeitos encontrados.

Synopsis of articles published in «Técnica» n.os 445/446

LII / LIII — December 1977 / January 1978

U. D. C. 378.962:371.214

JOSÉ MANUEL FONSECA DE MOURA

PLANNING OF THE SCHOOL YEAR CALLENDAR

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 153 a 156

The paper studies the engineering schools year callendar. It considers two levels of plannification. The global level establishes its division in two main periods — the school year itself and a complementary period. The local level quantifies the school related activity and from this, it advocates a new different organization of the present students schedule.

U. D. C. 371.3:378.962

MARIA DE LOURDES TEDESCHI BETTENCOURT
ALFREDO MANUEL FLORENÇO TOVAR DE LEMOS

EXPERIENCE IN TEAM TEACHING

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 157 a 164

The pedagogical principles constituting the scientific support for group pedagogy are presented, and the circumstances under which the experience, involving approximately 100 pupils, was held in 1970, 1971, and 1972, are characterized. The conclusions, taken from the reports of the participating pupils, in defense of team teaching as a natural human learning process, are summarized. A training process enabling future engineers to embark upon their professional careers both as highly qualified technicians and as well-balanced human beings has been considered a fundamental factor in this experience

U. D. C. 62.001.5

PEDRO LOURTIE
VENTURA SAMPAIO
NELSON ESTEVES
MARIO CORDEIRO

FROM RESEARCH TO INDUSTRIAL DEVELOPMENT

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 165 a 168

The activities of the institutions in Portugal dedicated to research and development in the engineering fields is briefly reviewed and a new plan of organisation is suggested.

U. D. C. 378.962

E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA

WHICH FUTURE FOR I. S. T. ?

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 129 a 138

The paper considers several basic points on which the future of IST will depend: the structure of engineering education in Portugal, the kind and number of engineering students, the qualitative and quantitative composition of the teaching staff, the organization of post-graduation courses, the full-and part-time teaching service, the organization of research, the relations with Industry.

U. D. C. 378.962:62.001

L. VALADARES TAVARES

EDUCATION IN ENGINEERING RELATED TO SOCIETAL DYNAMICS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 139 a 142

The impact of the engineers professional activity on the developing processes of portuguese society is studied and several remarks on the recommended methodology to set up the objectives for Education in Engineering are deduced from this analysis.

Somme targets and suggestions about the structure and contents of engineering education in Portugal are also presented in this paper.

U. D. C. 378.962

JOSÉ MANUEL FONSECA DE MOURA

THE ENGINEERING SCHOOLS AND ITS TEACHING/LEARNING PROCESS: TOPICS FOR DISCUSSION

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 143 a 152

The paper considers the teaching/learning process and the types of engineering schools. It analyses four topics, namely: i) the curricula structure, ii) the degrees and academic titles, iii) the pedagogy, iv) the functions and structure of the faculty. The underlying principles of the analysis are the professionalization of the schools, the formative caracter of its teaching/learning process, and its integration in the social structure. As methodology two levels are distinguished: the global level and the local level. The first corresponds to the basical objectives. The second allows for flexible concretization of these objectives.

Resumo dos Artigos publicados na «Técnica» n.os 445/446

Ano LII / LIII — Dezembro 1977 / Janeiro 1978

C. D. U. 371.214:624

J. S. BRAZÃO FARINHA

O ENSINO DA ENGENHARIA CIVIL NO NOSSO PAÍS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 169 a 171

Refere-se a posição actual do ensino da engenharia e indica-se uma necessidade de evolução, no sentido de podermos enfrentar os problemas concretos da comunidade nacional.

A primeira etapa da evolução a encarar é a preparação para a cobertura técnica do País, com vista aos problemas do quotidiano, dando satisfação às necessidades de resolução das questões básicas do nosso Povo, neste sector.

Não sendo uma faceta única, ela é sem dúvida a etapa mais urgente e prioritária, abrangendo um maior número de técnicos a formar anualmente.

C. D. U. 371.214:622

JOSÉ QUINTINO ROGADO

NOTA SOBRE OS CURSOS UNIVERSITÁRIOS PORTUGUESES DE ENGENHARIA DE MINAS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 181 a 186

Analisa-se a natureza dos cursos universitários de Engenharia e detalha-se a situação dos de Minas em Portugal, sugerindo-se certos ajustamentos.

C. D. U. 371.214:624

ANTÓNIO DE CARVALHO QUINTELA

PRINCÍPIOS PARA A REESTRUTURAÇÃO DO ENSINO DA ENGENHARIA CIVIL

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 173 a 179

Caracterizam-se os perfis dos engenheiros civis e definem-se os princípios que se entende deverem orientar a formação a facultar nos bacharelatos e nas licenciaturas, em Engenharia Civil, e as respectivas condições de acesso. Trata-se também do ensino de pós-graduação e faz-se uma breve referência à instituição de cursos para formar «técnicos de Engenharia».

C. D. U. 37.015:378.962

H. SIMÕES SANTOS

CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA: A FORMAÇÃO DO ENGENHEIRO

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 187 a 190

Partindo dos conceitos de **Formação** e de **Engenharia** procura-se explicitar o que o autor pensa estar neles implícito, organizando, assim, a defesa de uma formação técnico-económica e social para o engenheiro, ao longo da sua graduação.

Propõe-se a abolição do «divórcio» escola/engenheiro através de cursos de pós-graduação para actualização e aprofundamento de todos aqueles aspectos propostos na graduação.

Faz-se uma referência muito especial à Informática, tentando diversas perspectivas para os benefícios que resultam do seu conhecimento e utilização.

Finalmente faz-se referência ao caso de uma conceituada escola inglesa cuja orientação e actuação estão na linha das propostas do autor.

Synopsis of articles published in «Técnica» n.os 445/446

LII / LIII – December 1977 / January 1978

U. D. C. 371.214:622

JOSE QUINTINO ROGADO

THE MINING ENGINEERING COURSES OF PORTUGUESE UNIVERSTIES

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 181 a 186

The nature of University Courses for Engineers is commented with increase detail for the Portuguese Mining Courses.

Consequently, some adjustments in these courses are suggested

U. D. C. 371.214:624

J. S. BRAZÃO FARINHA

TEACHING OF CIVIL ENGINEERING IN PORTUGAL

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 169 a 171

It is refered the actual state of the engineering teaching and of an evolution necessity, in order to enable to face the real problems of the national community.

The first stage of the evolution to face is the preparation for the National technical cover responding to the necessities of solving our People fundamental questions, in this field, taking in consideration the daily problems.

Although it is not an unique facet, it is, undoubtedly, the most urgent and with more priority stage, dealing with a larger number of technicians to graduate each year.

U. D. C. 37.015:378.962

H. SIMÕES SANTOS

SOME HINTS ON ENGINEERING GLOBAL EDUCATION

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 187 a 190

The author attempts to point out what he considers to be implicit in the concepts of global education and engineering.

The abolition of the engineer's «divorce» from his college through post-graduate courses to up-dating and deepening of all those matters included in his graduation, is proposed.

A special reference is made to informatics, attempting various perspectives resulting from its Knowledge and use.

Finally, a reference is made to a renowed English college whose orientation and functioning are similar to the author's proposals.

U. D. C. 371.214:624

ANTONIO DE CARVALHO QUINTELA

PRINCIPLES FOR THE RE-ORGANIZATION OF CIVIL ENGINEERING EDUCATION

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 173 a 179

The civil engineers profiles are characterized and the principles that should guide the schoolar curricula and admission conditions are dicussed. Postgraduate studies are also considered and a brief reference to courses to prepare «technicians» is made.

Resumo dos Artigos publicados na «Técnica» n.os 445/446

Ano LII / LIII — Dezembro 1977 / Janeiro 1978

C. D. U. 72.011.1

RUY JOSÉ GOMES

NECESSIDADES HUMANAS E EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS DA HABITAÇÃO

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 191 a 219

Apresentam-se comentários de generalidade relativamente à definição das necessidades humanas e consequentes exigências funcionais da habitação e à sua confrontação com os condicionalismos de conjuntura que, na solução das carências habitacionais, possam constranger ou adiar a satisfação plena daquelas exigências.

Agrupam-se, por identidade de objectivos, e hierarquizam-se, por grau de essencialidade, as exigências a considerar.

Definem-se os princípios exigenciais e, com apoio na documentação referenciada, caracterizam-se as exigências seguintes:

- Exigências de SEGURANÇA
  - ESTRUTURAL E CONSTRUTIVA
    - perante solicitações correntes, de serviço
    - perante solicitações de ocorrência excepcional
    - perante solicitações de ocorrência acidental, em uso
  - contra RISCOS DE INCÊNDIO
  - na OCUPAÇÃO E USO
    - da circulação na habitação e acessos
    - contra quedas de andares elevados
    - das instalações e equipamentos
- Exigências de SAÚDE
  - por EQUILÍBRIO TÉRMICO
  - por CONDIÇÕES DE SALUBRIDADE
    - de abastecimento de água
    - de evacuação de águas e esgotos
    - de higiene pessoal
    - de higiene doméstica
    - de pureza do ar ambiente
    - de limpeza e desinfecção da habitação
- Exigências de CONFORTO
  - por CONDIÇÕES ACÚSTICAS
  - por CONDIÇÕES VISUAIS
  - por DISPONIBILIDADE DE ESPAÇO
- Exigências de SATISFAÇÃO
  - por SEGURANÇA ADICIONAL
  - na OCUPAÇÃO DOS ESPAÇOS
  - por CONDIÇÕES DE PRIVACIDADE
  - por FACILIDADES DE USO
  - por SUPLEMENTO DE CONFORTO
- Exigências de ECONOMIA

C. D. U. 624.057

JOSÉ A. TEIXEIRA TRIGO

INDUSTRIALIZAÇÃO E QUALIDADE DA CONSTRUÇÃO

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 221 a 230

Analisa-se a forma como se vem processando a industrialização da construção de edifícios e as suas consequências sobre a qualidade da construção, com especial ênfase sobre a actual situação da construção em Portugal. Esta análise baseia-se na experiência pessoal adquirida no LNEC em contacto com numerosas obras e sistemas de construção industrializada, e nos estudos que, sobre estes temas, vem realizando no âmbito do Plano de Edifícios desenvolvido no mesmo Laboratório.

Depois de se sintetizar a metodologia tradicional utilizada no controle de qualidade da construção, analisam-se as perturbações nela introduzidas pelos novos processos de construção industrializada. Referem-se as principais deficiências que se vêm encontrando. Propõem-se acções de apoio a novas metodologias de controle de qualidade, adequadas a uma indústria de construção renovada.

C. D. U. 699.81

ALFREDO MANUEL FLORENÇO TOVAR DE LEMOS
ILDEFONSO CABRITA NEVES
JOAQUIM DA CONCEIÇÃO VALENTE

ACÇÃO DOS INCÊNDIOS SOBRE A CONSTRUÇÃO

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 231 a 238

Chama-se a atenção para a necessidade de serem actualizados entre nós os conhecimentos relativos à acção dos incêndios sobre a construção, cujos aspectos principais se procurou pôr em evidência, no sentido de se obter um nível de protecção adequado.

Trabalha-se com os conceitos de resistência ao fogo dos elementos de construção relativamente às funções de compartimentação e de estabilidade. Referem-se por fim a alguns aspectos económicos ligados à problemática dos incêndios.

Synopsis of articles published in «Técnica» n.os 445/446

LII/LIII — December 1977/January 1978

U. D. C. 72.011.1

RUY JOSÉ GOMES

HUMAN HEEDS AND FUNCTIONAL REQUIREMENTS FOR HOUSING

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 191 a 219

Some general comments are presented on the definition of human needs and consequent functional requirements for housing, and on the confrontation with conjunctural limitations, which in the solution of housing needs may hamper or postpone full satisfaction of these needs.

The requirements to be considered are grouped according to the identity of their aims and graded according to their degree of priority.

The requirement principles are defined and with the help of the documentation referred to the following requirements are characterized:

- SAFETY requirements
  - STRUCTURAL AND CONSTRUCTIVE
    - under current service loads
    - under exceptional loads
    - under accidental loads, in use
  - against FIRE RISKS
  - under OCCUPATION and USE
    - of circulation in the house and its approaches
    - against falls from high storeys
    - of installations and equipments
- HEALTH requirements
  - through THERMAL EQUILIBRIUM
  - through SALUBRITY CONDITIONS
    - of water supply
    - of water and sewage disposal
    - of personal hygiene
    - of domestic hygiene
    - of ambient air freshness
    - of cleanliness and disinfection of the house
- COMFORT requirements
  - through ACOUSTIC CONDITIONS
  - through VISUAL CONDITIONS
  - through SPACE AVAILABILITY
- Requirements as to SATISFACTION
  - through INCREASED SAFETY
  - in SPACE OCCUPATION
  - through PRIVACY CONDITIONS
  - through FACILITY OF USE
  - through ADDITIONAL COMFORT
- ECONOMY requirements

U. D. C. 699.81

ALFREDO MANUEL FLORENÇO TOVAR DE LEMOS
ILDEFONSO CABRITA NEVES
JOAQUIM DA CONCEIÇÃO VALENTE

FIRE AND CONSTRUCTION

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 231 a 238

Atention is called to the need of bringing up to date in this country the knowledge about the action of fire on construction, whose essential aspects are emphasized in order that an appropriate level of protection may be achieved.

The concepts of fire resistance in compartment and stability functions are used. Finally, are refered some economical aspects involved in fire.

U. D. C. 624.057

JOSÉ A. TEIXEIRA TRIGO

BUILDING INDUSTRIALIZATION AND QUALITY

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 221 a 230

The way in which the industrialization of building construction is evolving and how this is affecting the quality of construction are analysed, with particular emphasis for the present situation of construction in Portugal.

This analysis is based on the author's experience at the LNEC, in contact with numerous works and industrialized construction systems, and on the studies he has been carrying out within the framework of the Plan for Building Construction developed at this Laboratory.

After synthesizing the methods usually adopted in the quality control of construction, the author analyses the changes introduced by the new methods of industrialized construction. The most important deficiencies are refered to. Actions for the support of new quality control methods are suggested, in view of a new and better industry of construction.

Resumo dos Artigos publicados na «Técnica» n.os 445/446

Ano LII / LIII — Dezembro 1977 / Janeiro 1978

C. D. U. 624.07[012.4]8

S. POMPEU DOS SANTOS

LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS PREFABRICADAS DE BETÃO

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 239 a 254

A prefabricação das estruturas dos edifícios implica a necessidade de executar em obra as ligações entre os elementos prefabricados. A concepção, projecto e execução das ligações envolve a resolução de certas questões específicas normalmente não contempladas na regulamentação aplicável às estruturas de betão armado e (ou) pré-esforçado ou à estrutura metálica.

Neste documento abordam-se as ligações entre as peças prefabricadas das estruturas reticuladas de betão, sob o ponto de vista das suas exigências, nomeadamente de segurança estrutural, de durabilidade, de montagem, etc., procurando-se apresentar os modos de como essas exigências poderão ser satisfeitas. Apresenta-se ainda uma classificação de ligações de acordo com vários parâmetros, fazem-se algumas considerações sobre a concepção e execução de alguns tipos de ligações, apresentam-se alguns exemplos de soluções realizadas por processos diversos e finalmente faz-se a apresentação dum programa de estudos a desenvolver no âmbito deste tema.

C. D. U. 627.8.09(679.4)

ALBERTO ABECASIS MANZANARES
ANTÓNIO CARRISSO
ANTÓNIO DE CARVALHO QUINTELA
ANTÓNIO JOSÉ DA COSTA SANTOS
JOÃO DE SALVADOR FERNANDES

A ENGENHARIA NACIONAL E A INSTALAÇÃO DE UNIDADES DE GRANDE POTÊNCIA. O CASO DE CABORA-BASSA

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 255 a 266

Apresenta-se o caso de Cabora-Bassa como testemunho da capacidade da engenharia portuguesa para a concepção e o projecto da instalação de unidades hidroeléctricas de grande potência.

Depois de uma descrição geral do aproveitamento, referem-se resumidamente os principais condicionamentos e problemas enfrentados, evidenciando a necessidade da sua consideração conjunta pelos fornecedores dos equipamentos e pelos projectistas das instalações.

C. D. U. 621.313.12:519.28

M. FERREIRA DE OLIVEIRA
J. REIS CARDOSO

ESTADOS DE AVARIA PARCIAL DE GRUPOS EM ESTUDOS DE RESERVA GIRANTE

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 267 a 274

A fixação da reserva girante feita em termos probabilísticos tem por objectivo garantir que a probabilidade da carga exceder a potência disponível não é superior a um valor fixado como admissível.

Estudos desta natureza fazem-se conhecendo as probabilidades, como função do tempo, dos grupos do sistema se encontrarem nos «estados» em que podem residir; a cada um dos possíveis estados em que um grupo pode residir está associada uma potência máxima que o grupo é capaz de produzir.

O presente trabalho apresenta uma metodologia que permite calcular as referidas probabilidades visando a sua utilização em estudos de fixação da reserva girante de um sistema electroprodutor.

C. D. U. 621.39(469)

MANUEL JOSÉ ABREU FARO
PEDRO LUÍS BORGES TEIXEIRA

CONCEPÇÃO E PROJECTO DE SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES NO PAÍS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 275 a 295

C. D. U. 665.51/58

LUÍS L. RAMALHETE

PETROQUÍMICA

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 297 a 303

C. D. U. 665.51/.58

JOÃO PEDRO ANTUNES GOMES

O COMPLEXO PETROQUÍMICO DE SINES; CONCEPÇÃO E ESTADO ACTUAL DOS TRABALHOS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 305 a 312

Após se dar conta dos diplomas legais que lançaram a indústria petroquímica de olefinas, apresenta-se a concepçãt do Complexo Petroquímico de Sines, empresas que nele participam, planeamento das instalações e investimentos previstos.

Descreve-se depois, de uma forma sumária, o estado dos trabalhos em curso, em fins de Agosto de 1977.

Synopsis of articles published in «Técnica» n.os 445/446

LII / LIII — December 1977 / January 1978

U. D. C. 621.39(469)

MANUEL JOSÉ ABREU FARO
PEDRO LUÍS BORGES TEIXEIRA

CONCEPTION AND PLAN OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS IN PORTUGAL

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 275 a 295

U. D. C. 624.07[012.4]8

S. POMPEU DOS SANTOS

CONNECTIONS IN PRECAST CONCRETE STRUCTURES

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 239 a 254

Precast building structures demand that connections between precast elements be made on the job. Design, project and production of connections require the resolution of certain specific problems, which are not usually envisaged in regulations for reinforced and prestressed concrete structures and steel structures.

In this paper connections between precast elements of concrete framed structures are dealt with from the point of view of such requirements as structural safety, durability and handling, in order to show how these requirements may be fulfilled. A classification of connections according to some parameters is also presented and some considerations are made about design and execution of some types if connections. Several examples of connections made by different methods are given. Finally the author presents a programme of studies to be undertaken within this scope.

U. D. C. 665.51/58

LUÍS L. RAMALHETE

PETROCHEMICALS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 297 a 303

U. D. C. 627.8.09(679.4)

ALBERTO ABECASIS MANZANARES
ANTÓNIO CARRISSO
ANTÓNIO DE CARVALHO QUINTELA
ANTÓNIO JOSÉ DA COSTA SANTOS
JOÃO DE SALVADOR FERNANDES

PORTUGUESE ENGINEERING AND THE INSTALLATION OF LARGE POWER UNITS. THE CASE OF CABORA-BASSA

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 255 a 266

The hydro-electric scheme of Cabora-Bassa is presented in order to attest the capacity of the Portuguese Engineering in the conception and design of power stations equipped with large units.

After a general description of the scheme, the principal constraints and problems which have been confronted are briefly referred, in order to emphasise the necessity that they must be jointly solved by the equipment manufacturers and the Consultants.

U. D. C. 665.51/.58

JOÃO PEDRO ANTUNES GOMES

THE SINES PETROCHEMICAL COMPLEX: THE CONCEPTION AND ACTUAL DEVELOPMENT OF THE WORKS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 305 a 312

After mentioning the legal documents that created the olefins petrochemical industry, we describe the conception of the Sines Petrochemical Complex, participating companies, installations planning and foreseen investments.

Afterwards, we summarise the actual development of the works, in the end of August 1977.

U. D. C. 621.313.12:519.28

M. FERREIRA DE OLIVEIRA
J. REIS CARDOSO

SPINNING RESERVE STUDIES INCLUDING GENERATOR OPERATED STUDIES

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 267 a 274

Spinning reserve studies including reliability techniques allow the risk evaluation, i.e. the probability of the system load exceeding the system capacity.

This studies require the knowledge of the individual probabilities of each of the generator states; eatch state is defined by the maximun capacity the generator is able to produce.

This paper presents a technique to evaluate each of the individual probabilities, as a function of time, of the generator states required in spinning reserve studies.

Resumo dos Artigos publicados na «Técnica» n.os 445/446

Ano LII / LIII — Dezembro 1977 / Janeiro 1978

C. D. U. 622.792+622.798

H. MAIA E COSTA

AGLOMERAÇÃO DE CONCENTRADOS FINOS DE MINÉRIOS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 349 a 354

Nos modernos processos da metalurgia extractiva exigem-se cargas devidamente apropriadas de modo a conseguirem-se produtividades tão elevadas quanto possível e custos energéticos tão reduzidos quanto possível.

Neste trabalho indicam-se os processos de aglomeração mais difundidos mundialmente e que tem a sua maior aplicação na indústria siderúrgica: sinterização e peletização.

Trata-se depois de inventariar o que já existe em Portugal e quais as perspectivas futuras tendo em atenção os recursos nacionais em minérios de ferro.

C. D. U. 621.3.016.33:518.5

J. M. FERREIRA DE JESUS
J. P. SUCENA PAIVA

SOLUÇÃO DO TRÂNSITO DE POTÊNCIA PELO MÉTODO DO DESACOPLAMENTO

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 365 a 382

O cálculo do trânsito (ou fluxo) de potência numa rede de energia eléctrica, é presentemente efectuado em computador digital por meio de diversos métodos numéricos, dentre os quais o mais sofisticado é o método de Newton-Raphson e suas variantes.

No artigo os autores descrevem um programa de cálculo baseado numa destas variantes, o método do desacoplamento, inicialmente proposto por Stott **[10]**.

É dada especial ênfase às técnicas de programação com esparsidade utilizadas. Apresentam-se os resultados numéricos obtidos para diversas redes, comparando-as com os obtidos pelo método de Newton-Raphson clássico.

C. D. U. 669.1:543.42.64

M. HELENA DE MELO CARVALHO

DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE REPARTIÇÃO SÓLIDO/LÍQUIDO EM LIGAS TERNÁRIAS Fn-Mn-C

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 355 a 364

Usando a técnica de análise por microsonda, determinaram-se coeficientes de repartição sólido/líquido para algumas ligas da região rica em Fe do sistema Fe-Mn-C. O método utilizado envolveu a microanálise de amostras temperadas a partir de temperaturas de equilíbrio na região L+γ.

C. D. U. 622.2:519.3

JOSÉ QUINTINO ROGADO

OPTIMIZAÇÃO DO BENEFICIAMENTO DE SISTEMAS DE JAZIDAS MINERAIS. APROPRIAÇÃO RACIONAL DOS RECURSOS MINERAIS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 383 a 388

No planeamento a níveis nacional ou regional e também no âmbito de uma grande empresa responsável por vários depósitos minerais, é-se conduzido ao problema da optimização global de sistemas de jazidas, os quais podem conter minérios diferentes.

Tomando como constrangimentos a taxa anual de produção de minério tal-qual e o teor mínimo dos concentrados aceite pelos utilizadores, o objectivo consiste em optimizar duas funcionais simultaneamente: a perda total em metal e a margem monetária global não actualizada.

Para rresolver este problema, usa-se a «função característica», já apresentada noutra oportunidade, mediante um processo de «homogenização» que se traduz na utilização de «teores reduzidos».

Deste modo, constroi-se a função característica global do sistema e pode obter-se facilmente a margem monetária optimizante que conduz à perda mínima em metal compatível com os constrangimentos.

O programa CARACT que optimiza as duas mencionadas funcionais é sumarizado e algumas das suas virtualidades analisadas.

Synopsis of articles published in «Técnica» n.os 445/446

LII / LIII — December 1977 / January 1978

U. D. C. 621.3.016.33:518.5

J. M. FERREIRA DE JESUS
J. P. SUCENA PAIVA

POWER FLOW SOLUTION BY THE DECOUPLING METHOD

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 365 a 382

The power flow solution in an electric energy system is currently executed by digital computer using several numerical methods, of which the most powerful is the Newton-Raphson and its variations.

In this paper the authors describe a computer programme based upon one of these variations, the decoupling method, initially suggested by Stott **[10]**.

The sparsity programming thecniques are specially emphazised. Numerical results for several real systems are presented, and compared with those obtained by the classic Newton--Raphson method.

U. D. C. 622.792+622.798

H. MAIA E COSTA

AGGLOMERATION OF FINE ORE CONCENTRATES

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 349 a 354

In extractive metallurgy modern processes for preparing the charges are required in order to reach as high as possible productivity and as low as possible energetic costs.

In this work are indicated the more worldly widspread agglomeration systems and those that have their main application in the siderurgical industry: sintering and pelletizing.

After that an inventory of what already exists in Portugal is drawn up together with its future prospects, paying attention to the national resources in iron ore.

U. D. C. 622.2:519.3

JOSÉ QUINTINO ROGADO

RATIONAL APPROPRIATION OF MINERAL RESOURCES AN OPTIMIZING CRITERION FOR BENEFICIATION OF SYSTEMS OF ORE DEPOSITS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 383 a 388

When planning for large areas, say a country, a mining district, or a great concern responsible for several mines, the exploitation and beneficiation policies deal with complex systems.

In a global view point, the **best** objective is to minimize the overall loss of metals and to maximize the total non--discounted monetary margin.

The most important constraints framing the resolution of such a problem are the minimum (or the maximum) grade levels of the concentrates to be produced and the annual rates of production admissible by the market.

The method developed in this paper is a quite general one and uses the concept of **characteristic function** elsewhere developed by means of an **homogenization** process which leads to consider the deposits set as a sole ore body, even if far apart ore bodies there exist.

The computer program CARACT (built up for the a. m. method) is outlined and results already obtained with it are summarized.

Finally, among other suggestions, the possibility of using this method for the evaluation of mineral resources in world scale, is advanced.

U. D. C. 669.1:543.42.64

M. HELENA DE MELO CARVALHO

DETERMINATION OF SOLID/LIQUID PARTION COEFFICIENTS IN Fe-Mn-C TERNARY ALLOYS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 355 a 364

Solid/liquid partition coefficients of some Fe-Mn-C alloys, at the Fe — rich corner, have been determined by means of electron probe microanalysis. The method used involved the microanalysis of specimens quenched from an equilibrium temperature in the $L+\gamma$ field.

Resumo dos Artigos publicados na «Técnica» n.os 445/446

Ano LII / LIII — Dezembro 1977 / Janeiro 1978

C. D. U. 669.14:621.785:620.163

ANTERA VALERIANA DE SEABRA

O CONTROLE DE QUALIDADE NOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 313 a 326

Em face da importância cada vez maior do «Controle de Qualidade» para garantia do nível de qualidade das peças obtidas segundo dado processo de fabricação referem-se no II Capítulo algumas considerações fundamentais, relativamente a peças sujeitas a tratamento térmico desde a selecção da matéria-prima até ao controle do produto final.

Para um melhor enquadramento do assunto recordam-se num primeiro capítulo as noções gerais relativas aos conceitos de Qualidade, Controle e Controle de Qualidade.

C. D. U. 621.791:621.311.2

SALGADO PRATA

ALGUNS ASPECTOS DA TECNOLOGIA DE SOLDADURA NA CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 339 a 343

Trata o tema Construção no que respeita à tecnologia de soldadura, aplicada a equipamentos para centrais térmicas, hidráulicas e nucleares, tal como actualmente se apresenta na empresa em que o autor exerce a sua actividade.

Faz-se um breve inventário dos processos de soldadura utilizados pela empresa na construção de equipamentos de energia.

Indicam-se limitações dos processos de soldadura provenientes do risco de provocarem deterioração durante o fabrico (fissuração a quente, a frio, durante tratamentos térmicos) ou em serviço, por exemplo, ruptura frágil ou corrosão.

Descrevem-se e exemplificam-se algumas técnicas para rodear as limitações mencionadas.

Referem-se alguns ensaios em cujos resultados se baseiam as técnicas adoptadas.

C. D. U. 621.762:669.1

CARLOS ALBERTO PACHECO DA SILVA

PULVEROMETALURGIA DE LIGAS FERROSAS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 327 a 338

Após se realçar o interesse da pulverometalurgia como tecnologia alternativa de enformação, faz-se uma breve descrição das etapas do processo e o modo como podem influenciar as propriedades.

Referem-se finalmente os tipos de ligas ferrosas mais frequentemente produzidas por pulverometalurgia.

C. D. U. 621.785:001.2:669.14

ANTÓNIO DE PÁDUA LOUREIRO

NECESSIDADE DE INVESTIGAÇÃO E DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO EM PORTUGAL NA ÁREA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 345 a 348

Portugal importa a quase totalidade dos aços de tratamento térmico que emprega na indústria. A falta, na maioria das empresas, de instalações de tratamentos térmicos devidamente apetrechadas e de pessoal com os indispensáveis conhecimentos, acarreta a rejeição de muitas peças logo após o tratamento ou a sua curta duração em serviço, causando grandes perdas para o País em divisas e em mão-de-obra. Por outro lado, a falta de investigação suficiente para resolução dos problemas que a indústria portuguesa defronta, não permite a racionalização dos tipos de aços a importar, impedindo uma decisão fundamentada sobre a eventual criação de uma acearia de aços especiais em Portugal, nem permite a optimização dos tratamentos mais adequados a cada caso.

Na presente comunicação apontam-se os problemas mais importantes nesta área, sugerindo-se seguidamente a criação de uma associação técnica e de uma oficina nacional de tratamentos térmicos dos aços, com vista a incentivar uma progressiva independência tecnológica de Portugal neste campo e a suprir as deficiências em instalações e em pessoal especializado com que lutam muitas empresas que necessitam de efectuar tratamentos térmicos a peças que produzem.

Synopsis of articles published in «Técnica» n.os 445/446

LII / LIII – December 1977 / January 1978

U. D. C. 621.791:621.311.2

SALGADO PRATA

SOME FEATURES OF WELDING TECHNOLOGY IN THE POWER EQUIPMENT FABRICATION

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 339 a 343

It deals with the subject construction on what is concerned with welding technology, applied to equipments for thermal, hydraulic and nuclear power plants as now it is presented in the department where the author works.

A brief inventory of the welding processes used by the factory ou the making of energy equipments is done.

Limitations of the welding processes because of the danger of causing deterioration during the making (fissures during thermal treatments) or on usage, for instance, fragile rupture or corrosion are indicated.

Some technics to dodge the above limitations are described and examples are given.

Reference is made to some experiments on which results the adopted thecnics are based.

U. D. C. 669.14:621.785:620.163

ANTERA VALERIANA DE SEABRA

QUALITY CONTROL IN HEAT-TREATMENT

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 313 a 326

Taking into account the increasing importance of Quality Control to guarantee the level of quality of parts obtained by any manufacturing process, in Chapter II some basic considerations are made as regards heat-treated parts, starting from the selection of raw-materials up to the control of the final product.

To put the matter inte its right perspective, Chapter I recalle some general notiens on the concepts of Quality Control and Control of Quality.

U. D. C. 621.785:001.2:669.14

ANTÓNIO DE PÁDUA LOUREIRO

HEAT TREATMENT OF STEELS: RESEARCH AND DEVELOPMENT NEEDS IN PORTUGAL

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 345 a 348

Portugal imports nearly all the seat treatable steels needed by her industry. The great majority of our factories lack suitable facilities and technical staff with appropriate experience on heat treating steel. This situation leads to the rejection of many parts which were just heat treated or upon a short period under service conditions. Spending in foreign currency and labour costs is thus unavoidable. On the other hand, insufficient research on industrial problems either thus not allow a sensible selection of the steel types which should be imported thus affecting a well based decision on the creation of a special steels industry or reduces the ability to optimization in each case.

In this paper a review is made of the most important problems in this area. Two suggestions are put forward: the creation of a technical association and the sitting up of a steel heat treatment work shop at a national level. In both cases the end results aimed at are: 1) to make our country progressively less technologically dependent on foreign know how and imports; and 2) to give technical support to those firms which have neither appropriate facilities nor sufficiently trained personnel to deal with their heat treatment problems.

U. D. C. 621.762:669.1

CARLOS ALBERTO PACHECO DA SILVA

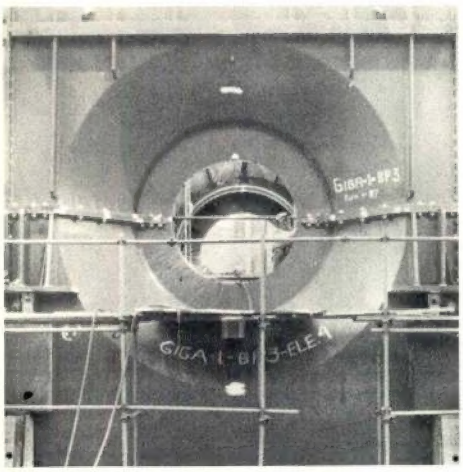
IRON POWDER METALLURGY

Técnica N.º 445/446 — LII/LIII — 12/1-1977/78, p. 327 a 338

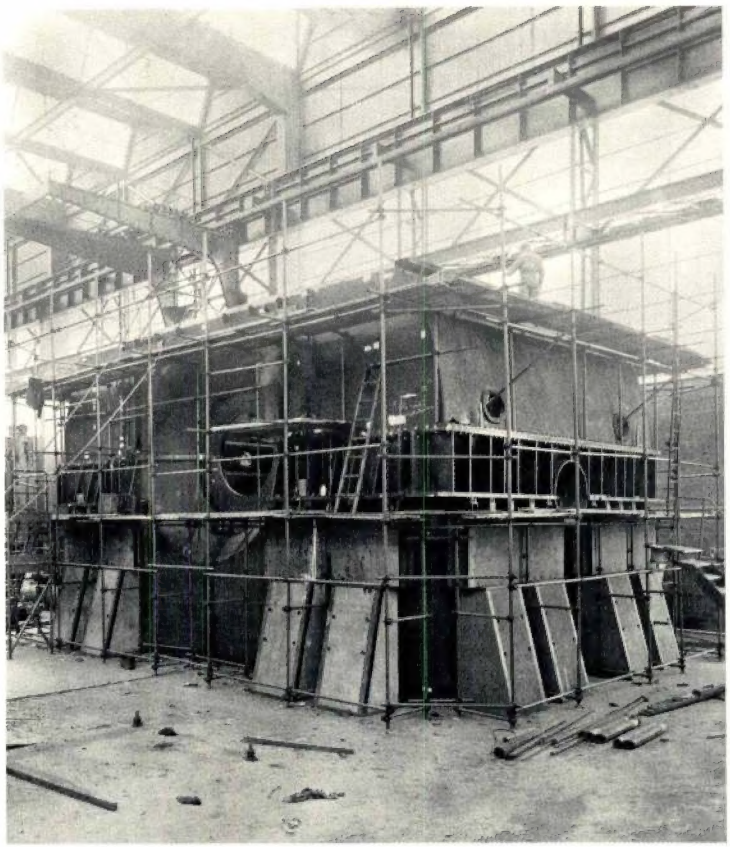
After emphasizing the interest of powder metallurgy as an alternative technology of metal forming, the steps of the process are described together with the way they influence the properties.

Finally the more usual ferrous alloys produced by powder metallurgy are referred.

A nossa vocação é exportar



Caixa de escape para uma central nuclear, destinada à Electricité de France



EQUIPAMENTOS HIDROMECÂNICOS

EQUIPAMENTOS ELECTROMECÂNICOS PARA CENTRAIS HIDROELÉCTRICAS E TÉRMICAS (CLÁSSICAS E NUCLEARES)

EQUIPAMENTOS PARA A INDÚSTRIA QUÍMICA E PETROLÍFERA

MATERIAL CIRCULANTE DE CAMINHO DE FERRO

EQUIPAMENTO OFFSHORE PARA PROSPECÇÃO E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO

CONSTRUÇÕES MODULADAS, PONTES E ESTRUTURAS

Países para onde temos exportado:

AFRICA DO SUL · ANGOLA · ARGENTINA · BRASIL · COSTA RICA · FRANÇA · GUATEMALA · IRÃO · IRAQUE · ISLÂNDIA KUWEIT · MALAWI · MARROCOS · MÉXICO · MOÇAMBIQUE NICARÁGUA · PAQUISTÃO · RODÉSIA · SUDÃO · TURQUIA UGANDA · U.S.A. · VENEZUELA · ZAIRE

SOREFAME

SOCIEDADES REUNIDAS DE FABRICAÇÕES METÁLICAS, S.A.R.L.
Amadora – Portugal

À procura da água (mole) ou da pedra (dura)

À procura de qualquer formação rochosa, independentemente da sua consistência – mole ou dura – **a linha ROC** actua com a maior eficiência.

Seja onde for o seu trabalho de captação de água, escavação, terraplanagem, sondagem, ancoragem, abertura de túneis, etc., a Atlas Copco possui o carro de perfuração adequado. Manobrável por um só homem.

De facto, a linha ROC, a mais vasta gama de carros de perfuração sobre lagartas, equipados com colectores de poeiras, permite-lhe abrir furos de 35 a 216 mm de diâmetro a profundidades para além de 200 m, com um rendimento insuperável.

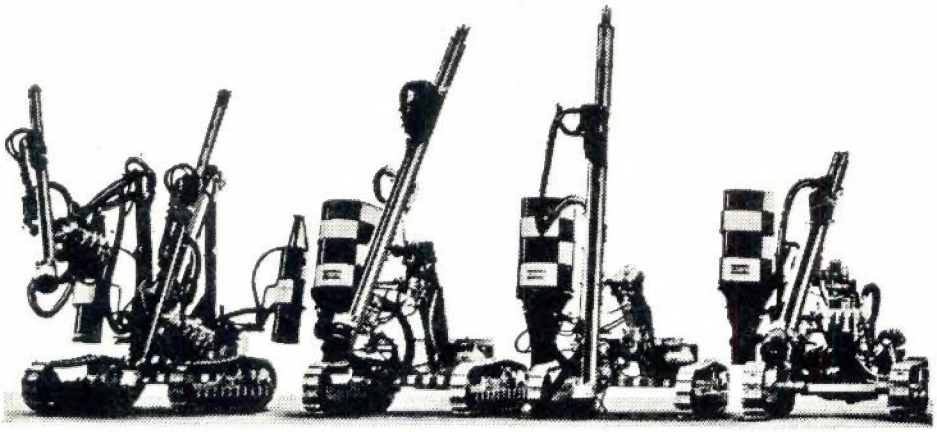
No entanto, se o seu caso exige outro equipamento de perfuração, de capacidade inferior ou superior, a solução está ao seu alcance. Exponha-nos o seu problema.

Contacte o **Centro de Ar Comprimido** mais próximo.

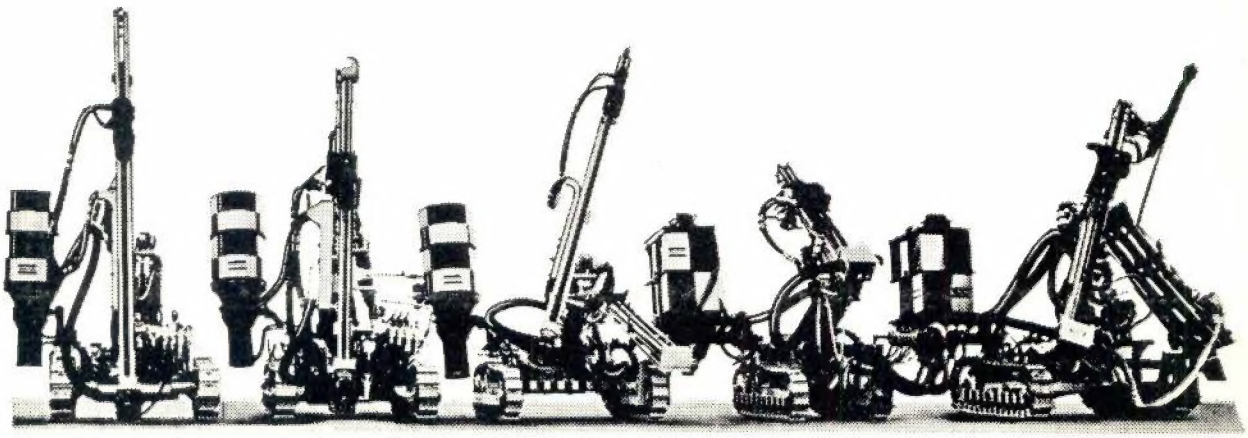
Soc. Atlas Copco de Portugal, Lda.

Centros de Ar Comprimido:

Lisboa (Linda-a-Velha) – Av. 25 de Abril – Tel. 219 00 11
Porto – Rua Eng.º Ferreira Dias, (à via rápida) – Tel. 691 071
Vila Viçosa – Largo D. João IV, 60 – Tel. 4 21 01



Atlas Copco



SISTEMA